



Universidad
Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior
Departamento de Tecnología Electrónica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Electrónica Industrial

*Diseño y fabricación de un sistema
de excitación y adquisición de datos
con interfaz a PC para ensayos de
HBLED's*

Autor: DAVID SANZ MOYA

Tutor: ERNESTO GARCÍA ARES



Universidad
Carlos III de Madrid

ACTA DE CALIFICACIÓN

Título: Diseño y fabricación de un sistema de excitación y adquisición de datos con interfaz a PC para ensayos de HBLED's

Autor: DAVID SANZ MOYA

Director: ERNESTO GARCÍA ARES

EL TRIBUNAL

Presidente: Antonio Lázaro Blanco

Secretario: Cristina Fernández Herrero

Vocal: Ricardo Albarracín Sánchez

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 9 de Septiembre de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, el tribunal acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

MATRÍCULA DE HONOR

Presidente

Secretario

Vocal

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a la persona que siempre ha estado a mi lado haciendo que la vida sea maravillosa, compartiendo las alegrías y penas, en los momentos buenos, malos y regulares. Por estar siempre “aquí cerquita”, a mi lado, y por ayudarme tanto a revisar el texto como el código y por esas palabras de acicate, “David, venga!! Ponte con el proyecto”.

GRACIAS Gloria!!

A mi familia, mis padres y mis hermanos, por todo el apoyo y la ayuda prestada siempre. Especialmente a mi madre por los trabajos de reprografía a mi padre por sus sabios consejos sobre el proyecto y sobre lo que no es el proyecto, a mi hermana Almudena por sus acertados consejos sobre el diseño gráfico y todas las horas dedicadas al ps, a mi hermanos Roberto por servirme de ejemplo en tantas cosas. GRACIAS!

A mi tutor del Proyecto Ernesto, por transmitirme con pasión sus conocimientos en las clases de electrónica durante la carrera, así como su ayuda y consejos en el diseño de la electrónica del proyecto. GRACIAS!

A todos mis compañeros durante la carrera por todos esos momentos inolvidables y todas esas noches “pitillenado” y “sujetando” las columnas de la entrada de la biblioteca y sin los que estos años no hubieran sido igual de buenos.

Alex, José, Suco, Bea, Paula, Gite, Fran, Samu, Richi, Tato, Jorge, Zaka, Sierra, Lara, Sara Benito, Iván, Javi “Parla”, Manu, Sergio, Rafa, César, Carlos, Rober, Andrés, Javi Cimorra, David, Elena, Angel, Arantxa, Marcos, Miki, Rosana, Sara Solanas, Super-Garri, Nichie, Rodri, Cabañas, Alberto...

GRACIAS A TODOS!!!

A todos los compañeros de trabajo de todos estos años: En el Banco Manoli y Ricardo, a Fernando, José Manuel y Guillermo y todos los demás en 3bymesa. Guardo un recuerdo muy especial de todos. Lo pasamos muy bien juntos y aprendí mucho y muy bueno de todos y cada uno de vosotros.

GRACIAS A TODOS!!!



Índice del Proyecto

Memoria	8
Capítulo 1.- Introducción	8
Capítulo 2.- Antecedentes y Objetivos del Proyecto	9
2.1.- Descripción básica de funcionamiento del LED	9
2.2.- Evolución histórica de los LEDs en la iluminación	11
2.3.- Objetivos del Proyecto	12
2.3.1.- LM-79-08 Mediciones eléctricas y fotométricas de productos de iluminación en estado sólido	12
2.3.2.- LM-80-08 Medición de estabilidad del flujo luminoso de productos de iluminación en estado sólido SSL	12
2.4.- Alcance del Proyecto	13
Capítulo 3.- Diseño electrónico del Hardware	14
3.1.- Especificaciones del diseño	14
3.2.- Arquitectura del sistema	14
3.3.- Diseño detallado de cada bloque del sistema	15
3.3.1.- Circuito de excitación o driver. Selección de la topología	15
3.3.2.- Parámetros generales del convertidor	16
3.3.3.- Teoría general del funcionamiento del convertidor tipo Buck o reductor	17
3.3.1.1.- Diseño del control del convertidor empleando el integrado LM3406	18
3.3.1.1.1.- Tensión de entrada y salida del convertidor	19
3.3.1.1.2.- Frecuencia de conmutación del convertidor	19
3.3.1.1.3.- Cálculo de los componentes del convertidor	20
3.3.1.1.3.- Corriente por el LED	22
3.3.1.1.4.- Cálculo de la bobina del convertidor	23
3.3.1.1.5.- Cálculo de otros elementos del convertidor	25
3.3.2.- Bloque CPU. Selección del interfaz de PC con el sistema	26
3.3.3.- Bloque Acondicionamiento y Control	27
3.3.4.- Bloque fuente de alimentación	28
3.4.- Diseño y fabricación de la placa de circuito impreso	29



3.4.1.- Diseño esquemático del circuito para realizar la PCB.....	29
3.4.2.- Consideraciones en el diseño de placas de circuito impreso.....	32
3.4.3.- Técnicas de diseño de placas de circuito impreso	33
Capítulo 4.- Diseño del Software.....	42
4.1.-Diseño del programa del microcontrolador del bloque CPU.....	42
4.1.2.- Introducción	42
4.1.3.- Descripción del programa	42
4.1.4.-Diagrama de flujo del programa del microcontrolador	45
4.2.-Diseño del programa de la consola interfaz de usuario	49
4.2.1.- Introducción	49
4.2.2.- Alcance del programa	49
4.2.3.- Diagrama de flujo del programa interfaz de usuario	51
Capítulo 6.- Pruebas y Resultados Experimentales del sistema.....	54
6.1.- Introducción a las pruebas del sistema.....	54
6.2.- Alcance de las pruebas del sistema	54
6.3.- Elementos necesarios para la realización de las pruebas.....	54
6.3.1.- Pruebas de funcionalidad de la consola.....	55
6.3.1.1.- Variación de la corriente entregada al LED.....	55
6.3.1.2.- Variación del valor de corriente a través del Slider, resolución de 8 bits.....	56
6.3.1.3.- Variación del valor de corriente introduciendo el valor por teclado, resolución de 12 bits	57
6.3.1.4.- Control de intensidad luminosa del LED	58
6.3.1.5.- Control de intensidad luminosa a través del pin DIM del integrado LM3406 ..	59
6.3.1.6.- Control de intensidad luminosa en modo bridge o bypass utilizando un MOSFET.	61
6.4.-Pruebas propias del convertidor Buck	63
6.4.1.- Prueba del convertidor con carga constante y tensión de entrada variable.....	68
6.4.1.1.- Prueba del convertidor con carga constante y tensión de entrada variable. LED de prueba N°1	68
6.4.1.2.- Prueba del convertidor a carga constante y tensión de entrada variable. LED de prueba N°2	69
6.4.1.3.- Prueba del convertidor con carga constante y tensión de entrada variable. LED de prueba N°3	71



6.4.2.1.- Prueba del convertidor a tensión nominal y carga variable. LED de ensayo Nº4 Color rojo.....	72
6.4.2.2.- Prueba del convertidor a tensión nominal y carga variable. LED de ensayo Nº4 Color rojo.....	74
6.4.2.3.- Prueba del convertidor a tensión nominal y carga variable. LED de ensayo Nº4 Color azul.....	75
6.5.- Resultados de las pruebas propias del Convertidor	79
Capítulo 7.- Conclusiones.....	81
Anexos a la memoria.....	82
A.1.- Factor de conversión de los datos de los convertidores analógicos digitales.....	82
A.2.- Software de programación de la placa ARDUINO	83
A.3.- Software de programación del Interfaz consola de PC.....	91
Planos.....	103
Pliego de Condiciones.....	108
1.- Normativa considerada.....	108
2.- El componente ARDUINO.....	108
3.- Hojas de características de los componentes principales	110
4.- Técnicas de soldadura empleadas para la fabricación del circuito impreso.....	114
Presupuesto.....	115



Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.- Proceso de recombinación radiante en un LED	10
Ilustración 2.- Diagrama de bloques del sistema	14
Ilustración 3.- Convertidor reductor básico	16
Ilustración 4.- Esquema general del control del convertidor reductor.....	17
Ilustración 5.- El integrado LM3406	18
Ilustración 6.- Circuito del convertidor controlado con LM-3406.....	18
Ilustración 7.- Inductancia de la bobina	20
Ilustración 8.- Modo de conducción continua	20
Ilustración 9.- Amplificador de error externo para control de la corriente	22
Ilustración 10.- Operación en régimen permanente de una bobina	24
Ilustración 11.- Tarjeta de desarrollo ARDUINO	27
Ilustración 12.- Esquema de bloques funcionales del integrado AMC7820	28
Ilustración 13.- Circuito bloque CPU	30
Ilustración 14.- Circuito de Bloque ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL	31
Ilustración 15.- Circuito de Bloque DRIVER.....	31
Ilustración 16.- Circuito de Bloque POWER.....	32
Ilustración 17.- Vías en PCB.....	33
Ilustración 18.- Frecuencia de auto - resonancia de condensadores.....	35
Ilustración 19.- Capa TOP	36
Ilustración 20.- Capa BOTTOM	37
Ilustración 21.- Capa GND 1	37
Ilustración 22.- Capa GND 2	38
Ilustración 23.- Situación de componentes.....	38
Ilustración 24.- Vista de la placa ya fabricada y montada.....	39
Ilustración 25.- Cara anterior de la placa fabricada	39
Ilustración 26.- Vista de la cara de componentes de la placa	40
Ilustración 27.- Vista lateral del conjunto apilado	40
Ilustración 28.- Vista general del conjunto	41
Ilustración 29.- Protocolo de Comunicación serie entre el PC y el microcontrolador	43
Ilustración 30.- El Bus SPI. Maestro - Esclavo.....	44
Ilustración 31.- Diagrama de flujo del software ejecutado en el microcontrolador.....	45
Ilustración 32.- Diagrama de tiempos para la comunicación SPI del integrado AMC7820.....	49
Ilustración 33.- Diagrama de flujo del programa del PC	51
Ilustración 34.- Montaje para efectuado durante las pruebas del sistema	55
Ilustración 35.- Consola interface del sistema	56
Ilustración 36.- Consigna de corriente 8 bits de resolución.....	56
Ilustración 37.- Consigna de corriente 12 bits de resolución.....	57
Ilustración 38.- Montaje para pruebas de medida de iluminancia	58
Ilustración 39.- Medida de iluminancia.....	59



Ilustración 40.- Dimming en modo enable. Salida al 100%.....	60
Ilustración 41.- Dimming en modo enable. Salida al 50%.....	60
Ilustración 42.- Dimming en modo enable. Salida al 25%.....	61
Ilustración 43.- Dimming en Modo bridge o bypass. Salida al 50%	62
Ilustración 44.- Dimming en Modo bridge o bypass. Salida al 25%	62
Ilustración 45.- Montaje para pruebas propias del convertidor	63
Ilustración 46.- Formas de onda para VIN = 18 V y ILED = 0.350 A.....	68
Ilustración 47.- Formas de onda para VIN = 24 V y ILED = 0.350 A.....	68
Ilustración 48.- Formas de onda para VIN = 30 V y ILED = 0.350 A.....	69
Ilustración 49.- Formas de onda para, VIN = 18 V y ILED = 0.700 A.....	69
Ilustración 50.- Formas de onda para, VIN = 24 V y ILED = 0.700 A.....	70
Ilustración 51.- Formas de onda para, VIN = 30 V y ILED = 0.700 A.....	70
Ilustración 52.- Formas de onda para, VIN = 18 V y ILED = 1 A.....	71
Ilustración 53.- Formas de onda para, VIN = 24 V y ILED = 1 A.....	71
Ilustración 54.- Formas de onda para, VIN = 30 V y ILED = 1 A.....	72
Ilustración 55.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, ILED = 0.350 A.....	72
Ilustración 56.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, ILED = 0.350 A.....	73
Ilustración 57.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, ILED = 0.350 A.....	73
Ilustración 58.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, ILED = 0.700 A(LED Rojo)	74
Ilustración 59.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, ILED = 0.700 A(LED Rojo)	74
Ilustración 60.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, ILED = 0.700 A (LED Rojo)	75
Ilustración 61.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, ILED = 0.350 A (LED Azul).....	75
Ilustración 62.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, ILED = 0.350 A (LED Azul).....	76
Ilustración 63.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, ILED = 0.350 A (LED Azul).....	76
Ilustración 64.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, ILED = 0.700 A (LED Azul).....	77
Ilustración 65.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, ILED = 0.700 A (LED Azul).....	77
Ilustración 66.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, ILED = 0.700 A (LED Azul).....	78
Ilustración 67.- Circuito de adaptación ADC	82



Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.- Longitud de onda de un fotón	10
Ecuación 2.- Tensión máxima de salida del convertidor	19
Ecuación 3.- Ciclo de trabajo del convertidor	19
Ecuación 4.- Inductancia y tamaño de la bobina	19
Ecuación 5.- Cálculo de R_{ON}	21
Ecuación 6.- Cálculo de T_{ON}	21
Ecuación 7.- Corriente del convertidor	22
Ecuación 8.- Energía almacenada en una bobina.....	23
Ecuación 9.- Tensión en la bobina.....	23
Ecuación 10.- Condición de régimen permanente bobina.....	24
Ecuación 11.- Rizado de la corriente en la bobina	24
Ecuación 12.- Cálculo de la bobina del convertidor	25
Ecuación 13.- Cálculo de C_{IN}	26
Ecuación 14.- DLC.....	26
Ecuación 15.- Inductancia en vías	33
Ecuación 16.- Cálculo experimental de T_{ON}	66
Ecuación 17.- Cálculo experimental de T_{OFF}	66
Ecuación 18.- Cálculo de la potencia de entrada al convertidor.....	66
Ecuación 19.- Cálculo de la potencia de salida del convertidor.....	66
Ecuación 20.- Cálculo del rendimiento energético del convertidor.....	67
Ecuación 21.- Factor de regulación de línea	67
Ecuación 22.- Factor de regulación de carga	67



Índice de Tablas

Tabla 1.- Semiconductores habituales, longitud de onda (λ) aproximada y su color correspondiente	9
Tabla 2.- Cálculos del convertidor. Tiempos de conmutación	21
Tabla 3.- Cálculos del rizado de la corriente de salida del convertidor	25
Tabla 4.- Frecuencias de los condensadores atendiendo al material de fabricación	35
Tabla 5.- Medidas para $V_{IN} = 18\text{ V}$ y $I_{LED} = 0.350\text{ A}$	68
Tabla 6.- Medidas para $V_{IN} = 24\text{ V}$ y $I_{LED} = 0.350\text{ A}$	68
Tabla 7.- Medidas para $V_{IN} = 30\text{ V}$ y $I_{LED} = 0.350\text{ A}$	69
Tabla 8.- Medidas para, $V_{IN} = 18\text{ V}$ y $I_{LED} = 0.700\text{ A}$	69
Tabla 9.- Medidas para, $V_{IN} = 24\text{ V}$ y $I_{LED} = 0.700\text{ A}$	70
Tabla 10.- Medidas para, $V_{IN} = 30\text{ V}$ y $I_{LED} = 0.700\text{ A}$	70
Tabla 11.- Medidas para, $V_{IN} = 18\text{ V}$ y $I_{LED} = 1\text{ A}$	71
Tabla 12.- Medidas para, $V_{IN} = 24\text{ V}$ y $I_{LED} = 1\text{ A}$	71
Tabla 13.- Medidas para, $V_{IN} = 30\text{ V}$ y $I_{LED} = 1\text{ A}$	72
Tabla 14.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.350\text{ A}$	72
Tabla 15.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.350\text{ A}$	73
Tabla 16.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, $I_{LED} = 0.350\text{ A}$	73
Tabla 17.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)	74
Tabla 18.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)	74
Tabla 19.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)	75
Tabla 20.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.350\text{ A}$ (LED Azul)	75
Tabla 21.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.350\text{ A}$ (LED Azul)	76
Tabla 22.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, $I_{LED} = 0.350\text{ A}$ (LED Azul)	76
Tabla 23.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)	77
Tabla 24.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)	77
Tabla 25.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)	78
Tabla 26.- Resultados de los ensayos propios del convertidor	79



Memoria

Capítulo 1.- Introducción

El presente documento técnico recoge los cálculos y consideraciones de diseño necesarios para la implementación de un sistema de excitación y adquisición de datos con interfaz a PC para ensayos sobre HBLEDs.

Este sistema permite realizar ensayos sobre LEDS de alto brillo desde un PC. Entre las principales funcionalidades del sistema está la de alimentar el LED objeto de ensayo con una corriente continua constante y controlada por consignas enviadas desde el PC que se utilice para realizar el ensayo. La concepción modular del sistema hace posible acometer las futuras ampliaciones de un modo sencillo desde el punto de vista del Hardware, ya que basta con diseñar nuevos módulos apilables que implementen nuevas funcionalidades al sistema.

Para el desarrollo del proyecto se han realizado investigaciones acerca de las tecnologías y componentes existentes en el momento más apropiados para poder llevarlo a término satisfactoriamente.

Es conveniente tener en cuenta que, el crecimiento exponencial de la tecnología LED en el campo de la iluminación, hace posible que, en el momento de consulta de este documento, ya existan soluciones técnicas más apropiadas que las elegidas.

Capítulo 2.- Antecedentes y Objetivos del Proyecto

2.1.- Descripción básica de funcionamiento del LED

Antes de profundizar en los aspectos técnicos del proyecto, resulta conveniente hacer una breve introducción de los dispositivos LED que pretendemos caracterizar. En primer lugar, el nombre es el acrónimo en inglés de Light Emitting Diode (en castellano diodo emisor de luz), es decir, un diodo que cuando se polariza en directa y es atravesado por una corriente emite una radiación luminosa proporcional a dicha corriente.

La longitud de onda de la luz emitida depende del material semiconductor del que esté constituido el diodo pudiendo variar desde el ultravioleta al infrarrojo, tal como se muestra en la tabla 2.1. Los materiales semiconductores más habitualmente empleados son compuestos de Arsénico, Fósforo y Galio (GaAsP, GaP, GaAs) y aleaciones de éstos con otros elementos, principalmente de los grupos 13 y 15 de la Tabla Periódica como Aluminio, Indio y Nitrógeno. También se utilizan semiconductores a base de Carburo de silicio (SiC) o Seleniuro de Zinc (ZnSe).

Material	Longitud de onda (λ)	Color
AlGaAs, GaAs	$\lambda > 760$ nm	Infrarrojo
GaAsP, AlGaInP, GaP, AlGaAs	$610 \text{ nm} < \lambda < 760$ nm	Rojo
GaAsP, AlGaInP, GaP	$590 \text{ nm} < \lambda < 610$ nm	Naranja
GaAsP, AlGaInP, GaP	$570 \text{ nm} < \lambda < 590$ nm	Amarillo
GaAsP, AlGaInP, GaP	$500 \text{ nm} < \lambda < 570$ nm	Verde
SiC, ZnSe, InGaN	$450 \text{ nm} < \lambda < 500$ nm	Azul
InGaN	$400 \text{ nm} < \lambda < 450$ nm	Violeta
AlIn, AlGaIn, AlGaInN	$\lambda < 400$ nm	Ultravioleta

Tabla 1.- Semiconductores habituales, longitud de onda (λ) aproximada y su color correspondiente

En los diodos semiconductores, al hacer circular una corriente eléctrica que atraviese la unión P-N, se inyectan electrones desde la región N hacia la región P y huecos desde la región P hacia la región N. Estos portadores se recombinan en la zona de carga de espacio, de modo que un electrón situado en la banda de conducción “cae” hasta la banda de valencia. La energía perdida por el electrón en este proceso (precisamente la diferencia de energía entre la banda de conducción y la de valencia, o energía del gap, E_g) puede liberarse en forma de calor (recombinaciones no radiantes) o en forma de radiación electromagnética, siendo estas últimas denominadas recombinaciones radiantes. La mayoría de las recombinaciones son no radiantes y lo que producen es calor (por ejemplo en los diodos rectificadores de Silicio habitualmente empleados en dispositivos electrónicos). En los LED, al estar hechos con materiales semiconductores de gap directo, se producen recombinaciones radiantes, de modo

que, en cada recombinación electrón-hueco, se emite un fotón de radiación electromagnética, cuya longitud de onda, λ , es:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g}$$

Ecuación 1.- Longitud de onda de un fotón

Donde la que h y c son la constante de Plank y la velocidad de la luz respectivamente.

El proceso descrito se muestra en la Ilustración 1.

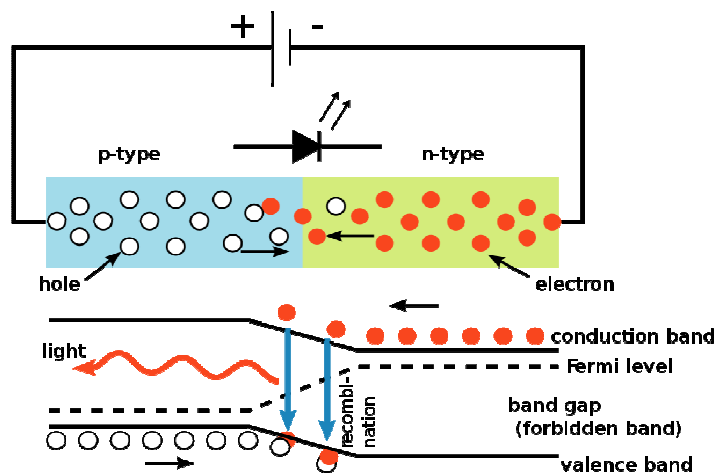


Ilustración 1.- Proceso de recombinación radiante en un LED

Al ser E_g de un valor determinado para cada material semiconductor, los LED son esencialmente monocromáticos, es decir, emiten luz de una sola longitud de onda (o de un único color).

Para conseguir luz blanca (esto es, que contenga todos los colores del espectro visible) con LED caben dos opciones:

- Utilizar tres LED que emitan en los tres colores básicos rojo, verde y azul (Red, Green & Blue, RGB) en la proporción de intensidades adecuada para que la mezcla sea percibida como luz blanca.
- Utilizar un LED azul o ultravioleta de alta intensidad para iluminar un material fluorescente que absorbe los fotones de longitudes de onda cortas y emite la energía absorbida en forma de fotones de mayor longitud de onda (menor energía), de modo que la mezcla de colores se perciba como luz blanca.

De estos dos métodos el último, que es parecido al mecanismo utilizado para producir luz blanca en las lámparas fluorescentes, es el más habitualmente utilizado.



2.2.- Evolución histórica de los LEDs en la iluminación

Desde que en 1962 Nick Holonyak en GE comercializara el primer LED de color rojo ha cambiado mucho la tecnología y las aplicaciones de los LEDs, y es que han pasado de ser pequeños indicadores de estado de multitud de artefactos eléctricos, a revolucionar la iluminación tradicional en todos los campos de la luminotecnia. Todo esto es gracias a los LED de alto brillo que aparecieron allá por el año 1993 fruto del trabajo de Shuji Nakamura que desarrolló los LEDs de InGaN que emitían en azul y verde de alto brillo. Los primeros pasos de los LEDs de alto brillo, a los que de ahora en adelante denominaremos HBLEDs, en la iluminación corriente fueron la de desempeñar funciones de balizamiento, iluminando escaleras, salidas de emergencia, etc...

Rápidamente los HBLEDs se han abierto camino en aplicaciones de iluminación tradicionalmente implementadas con otro tipo de lámparas, como por ejemplo las lámparas de descarga de sodio y mercurio a alta presión para luminarias de calles y carreteras, fachadas de edificios, monumentos y fuentes.

Desde hace ya un tiempo han entrado en el mercado de la automoción. Además de en la parte posterior del vehículo como luces de señalización, aparecen en la parte frontal y surgen las “Daylights” o “Runninglights”. Comercialmente, desde 2007, Lexus equipa de serie en su modelo 600LH tecnología LED para el sistema de alumbrado principal, con lo que una de las industrias más importantes en cuanto a volumen de ventas, como es la del automóvil, empieza a incorporar los HBLEDs como un estándar, como ya ocurrió con las lámparas de descarga (Xenon), que podrían estar alcanzando una madurez prematura por la velocidad con que está entrando la tecnología LED. De hecho se denomina a la iluminación con tecnología LED como SSL, “Solid – State Lighting”, y así se recoge en todos los organismos que preparan y aseguran los estándares como el IESNA, ANSI, etc...

Pero no es sólo el reclamo tecnológico e innovador que tienen los sistemas de iluminación en estado sólido lo que está impulsando su avance en el mercado, sino que, es primordial el importante ahorro energético que representan frente a los sistemas tradicionales (lámparas de filamento) e incluso frente a las lámparas de CFL (lámparas fluorescentes compactas) que también podrían tener una obsolescencia prematura, ya que ni siquiera es un producto totalmente maduro (aún está en fase de evolución) y, sin embargo, parece que las lámparas basadas en SSL le pisan terreno a pasos agigantados.

Aparte de su alta eficiencia, otro factor que puede favorecer la ocupación de una cuota de mercado significativa por la tecnología LED, es la incidencia que tiene la luz en la salud de los seres vivos. Hasta hace muy poco la finalidad de una lámpara era la de transformar, más o menos eficientemente, la energía eléctrica en luz sin entrar mucho en la calidad de la misma. Sin embargo, cada vez son más los estudios e informes que aseguran que el impacto que tiene la luz en la salud de las personas es muy alto, tanto a nivel fisiológico como psicológico. Esto tiene un gran calado en la sociedad que cada vez más se preocupa de la calidad de la luz, por lo que arquitectos e ingenieros seleccionan cuidadosamente la iluminación de los espacios en



función del uso que se va a hacer de ellos, recurriendo cada vez más a menudo a los LEDs en espacios de oficinas, en colegios, en hospitales, en hoteles, en túneles, en comercios y cada vez en más lugares.

De hecho, actualmente en el mercado, se pueden encontrar con mayor o menor calidad lámparas de sustitución de las tradicionales pero con tecnología LED. En opinión del autor, el fondo de la idea es bueno, pero falla la implementación, ya que es difícil adaptar unas especificaciones a un factor de forma o diseño concebido para otro dispositivo. En ese sentido se puede decir que se está empezando la casa por el tejado, porque es complicado adaptar una lámpara de LEDs a un casquillo E27, el de las lámparas incandescentes tradicionales.

2.3.- Objetivos del Proyecto

Dentro de los objetivos del proyecto, el principal es diseñar un sistema capaz de poder medir y cuantificar las variables que más afectan a los HBLEDs en aplicaciones de iluminación. Con el fin de conocer cuáles son estas variables que producen efectos adversos en los dispositivos de iluminación basados en tecnología LED, se ha realizado una investigación en busca de normativa técnica al respecto. Fruto de esta investigación se ha encontrado normativa publicada por IESNA, Illuminating Engineering Society of North America (<http://www.ies.org>).

Esta normativa recoge en dos normas **IES LM79-08** e **IES LM80-08**, tanto el método válido para realizar las pruebas eléctricas, como las mediciones ópticas. Además, pone de manifiesto cuáles son las variables que más afectan al funcionamiento y durabilidad de los HBLED.

2.3.1.- LM-79-08 Mediciones eléctricas y fotométricas de productos de iluminación en estado sólido

Esta norma describe los procedimientos a seguir y consideraciones a tener en cuenta para realizar mediciones en pruebas de luminosidad total, alimentación eléctrica, distribución de la intensidad luminosa y medida de cromaticidad en sistemas de iluminación de propósito general y bajo condiciones estándar.

2.3.2.- LM-80-08 Medición de estabilidad del flujo luminoso de productos de iluminación en estado sólido SSL

Esta norma expone un método para cuantificar la estabilidad del flujo luminoso de una fuente de luz construida a base de HBLEDs, es decir, el producto comercial terminado que está a disposición del consumidor en el mercado, incluido el circuito de excitación o driver y demás elementos que acompañen al dispositivo.

Los ensayos con HBLEDs siguiendo este método, dan como resultado una estimación acerca de la vida útil de los mismos. Según explica la norma, la vida útil de las lámparas con tecnología LED se clasifica en dos clases: L70 y L50, indicadores que acompañan al número de horas que el fabricante asegura como vida útil de la lámpara. Cada uno de los indicadores de clase hace



referencia a la cantidad en tanto por ciento (70% y 50% respectivamente) de la luz que emite la lámpara transcurrida la vida útil de la misma. Por ejemplo: un fabricante que asegura en sus lámparas una vida útil de 100.000 horas L70 o 150.000 horas L50, está diciendo que su lámpara, transcurridas 100.000 horas proporciona al menos el 70% de la luz que emitía tras su puesta en servicio, y transcurridas 150.000, al menos el 50 %.

2.4.- Alcance del Proyecto

El objetivo de este proyecto es el diseño global un sistema completo de ensayo para LEDs de alto brillo acorde con lo descrito en las normas citadas anteriormente, y principalmente se ha centrado en el desarrollo e implementación de uno de los bloques que forman este sistema: el driver de excitación del LED objeto de ensayo.

Según las normas publicadas por el IESNA citadas anteriormente, los parámetros que más afectan a la degradación del LED son: la corriente de excitación y la temperatura del núcleo del LED. Para ello, este proyecto recoge todos los cálculos necesarios para diseñar y construir un driver controlado por microprocesador que permita obtener mediciones de la corriente que excita al LED durante el ensayo. El bloque de control de la temperatura no entra dentro del alcance de este proyecto, y se plantea su desarrollo para futuras ampliaciones del sistema.

Dentro de las funcionalidades con las que cuenta el sistema, la principal es la de poder alimentar al LED con una corriente controlada y ajustable desde el PC, incluyendo diferentes métodos de variación de la luz emitida o “dimming”. Para ello se ha diseñado un circuito de excitación o driver basado en un convertidor tipo Buck (o reductor) integrado y se ha programado un software que facilita la interacción con el banco de pruebas desde el PC, enviando consignas desde la consola al driver y medidas del driver hacia la consola. Modificando este software, se pueden programar diferentes tipos de ensayos sobre el LED.

Capítulo 3.- Diseño electrónico del Hardware

3.1.- Especificaciones del diseño

1. El sistema debe funcionar con una tensión de corriente continua proporcionada por una fuente OEM o de laboratorio estándar para poder facilitar la instalación del sistema en cualquier laboratorio donde se desee realizar el ensayo. El sistema debe poder manejar LEDs y arrays de LEDs de distintas potencias y corrientes en un rango mínimo desde 350 mA (LEDs de $\approx 1\text{W}$) hasta corrientes por encima de 1 A (LEDs de $\approx 10\text{W}$) o varias series de LEDs desde 350 mA a 1 A.
2. La corriente aplicada al LED debe poder controlarse desde el PC, contemplando los tres métodos de control de intensidad o “dimming” habitualmente utilizados con HBLEDs y que se realizan normalmente:
 - Mediante la variación de la magnitud (valor) de la corriente de alimentación del LED.
 - Mediante la modulación de la corriente (de valor constante) de alimentación a través de una señal PWM ya sea habilitando o deshabilitando la salida del driver, o bien puenteando la salida del driver a través de un transistor mosfet en paralelo con el LED objeto de “dimming”.
3. El sistema debe poder ser controlado desde cualquier PC así como poder recibir datos por un protocolo estándar sin importar el sistema operativo que se utilice.
4. El sistema debe de ser modular para así poder añadir con posterioridad otras funcionalidades, de modo que sea fácilmente adaptable a posibles necesidades futuras.

3.2.- Arquitectura del sistema

Para afrontar el diseño del sistema se plantean inicialmente seis bloques funcionales que se detallan a continuación:

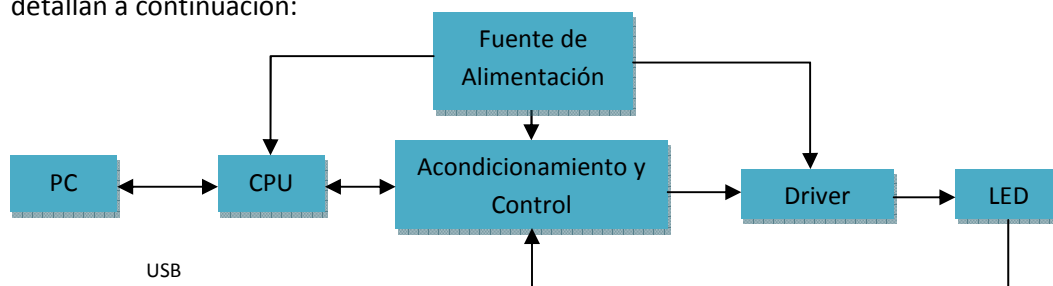


Ilustración 2.- Diagrama de bloques del sistema



PC

Este bloque está constituido por un ordenador personal cuyos únicos requerimientos son los de tener un sistema operativo Windows, Mac o Linux, un procesador Pentium IV a 1.6 GHz o superior, 256 Mb de memoria RAM y un puerto USB libre. Este PC es el que se utilizará para comunicarse con el sistema para controlarlo, enviar consignas y recibir datos.

CPU Local

Este bloque es el encargado principalmente de las comunicaciones entre nuestro sistema y el PC. Se encarga de transmitir las consignas recibidas desde el exterior a los otros bloques así como de transmitir al PC los datos recibidos desde el bloque de Acondicionamiento y Control.

Acondicionamiento y Control

Este bloque actúa como interfaz entre la CPU local, cuyo funcionamiento es digital, y “el mundo real”, esencialmente analógico, que incluye el LED y su circuito de excitación o driver. Incluye, por tanto, los conversores analógico-digitales y digital-analógicos necesarios para pasar medidas hechas sobre el LED a la CPU y consignas de ésta al driver.

Driver

El driver se encarga de generar la corriente continua necesaria para excitación del LED objeto de estudio. El valor de esta corriente y el modo en que se controla se pueden modificar desde el PC (a través de la CPU y el bloque de acondicionamiento y control).

Fuente de alimentación

Como su propio nombre indica este bloque contiene una fuente de alimentación regulada para alimentar todos los bloques que componen el sistema según sus requerimientos individuales de alimentación.

3.3.- Diseño detallado de cada bloque del sistema

3.3.1.- Circuito de excitación o driver. Selección de la topología

Atendiendo a la primera regla de diseño, se comenzó seleccionando la topología del convertidor de energía a implementar. Dentro de las topologías clásicas de convertidores de continua que existen se ha optado por la más sencilla, la tipo Buck o reductor (ver Ilustración 3), que permite convertir una tensión continua de entrada en una tensión de salida más pequeña.

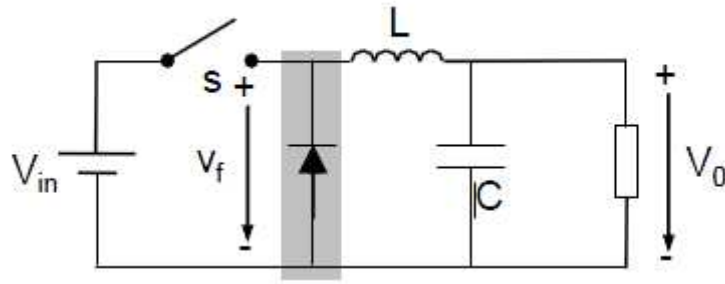


Ilustración 3.- Convertidor reductor básico

La elección de esta topología está justificada, ya que en nuestro caso la tensión de entrada, V_{in} , en general, es siempre mayor que la que necesitamos obtener a la salida, V_o , que no es más que la caída de tensión que se produce en la conducción en directa de un diodo LED de alto brillo, que es de alrededor de tres o cuatro Voltios. Además cuenta con otras ventajas como son la de poder manejar fácilmente la potencia y, aunque no es un parámetro del diseño, se mejora el rendimiento respecto de otras alternativas, como el elevador o el elevador-reductor que, además, son menos flexibles en cuanto a la regulación de la potencia.

3.3.2.- Parámetros generales del convertidor

A continuación se definen los parámetros generales del convertidor Buck o reductor. Estos parámetros aplicados a las ecuaciones mostradas más adelante servirán de ayuda para el diseño del convertidor a implementar. Estos parámetros son:

- V_{in} - Es la tensión de entrada al convertidor.
- V_o - Es la tensión de salida del convertidor que en este tipo de convertidores es siempre menor que la de entrada.
- T_{ON} - Es el periodo de tiempo en que el interruptor de la Ilustración 3, S, permanece cerrado.
- T_{OFF} - Es el periodo de tiempo en el que el interruptor de la Ilustración 3, S, permanece abierto.
- T - Es el periodo total de un ciclo de operación del interruptor de la Ilustración 3, S, y es la suma de los dos periodos $T_{ON} + T_{OFF}$.
- f_{OSC} - Tiene el valor del inverso del periodo T , y es la frecuencia a la que conmuta el interruptor S de la Ilustración 3.
- D - Representa el ciclo de trabajo del convertidor, T_{ON}/T y para el caso del convertidor tipo Buck, es también la relación entre la tensión en la salida y en la entrada.

3.3.3.- Teoría general del funcionamiento del convertidor tipo Buck o reductor

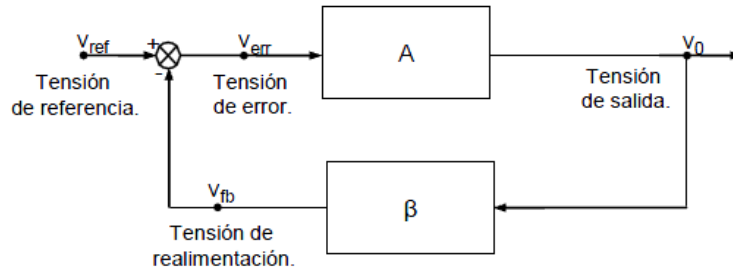


Ilustración 4.- Esquema general del control del convertidor reductor

El funcionamiento general de la regulación del sistema atendiendo a la ilustración anterior es el siguiente:

La tensión de referencia es la consigna de tensión que queremos obtener a la salida del convertidor y la tensión de error es la resultante de restar a la de referencia o consigna la obtenida a la salida del convertidor. En función de esa tensión de error debemos actuar sobre el interruptor o Switch, S en la Ilustración 3, abriendo y cerrando éste el tiempo necesario para mantener la tensión de salida deseada.

Para nuestro caso, en el que la carga es un LED, lo que queremos es controlar la corriente que circula por el dispositivo, ya que la intensidad luminosa emitida es proporcional a esta corriente, mientras la caída de tensión en el LED es aproximadamente constante para las corrientes habituales de trabajo. Para conseguir este control de corriente, se utiliza una resistencia de bajo valor en serie con el LED, en la que obtenemos una tensión proporcional a la corriente circulante.

En un primer momento se valoró la posibilidad de realizar el control del convertidor con un microprocesador y se realizaron pruebas implementando un control proporcional integral que en función de la tensión a la salida del convertidor incrementaba el ciclo de trabajo de una señal PWM que controlaba el interruptor S y permitía controlar el convertidor.

Esta posibilidad tenía dos defectos principales: que el microcontrolador no podía manejar altas frecuencias de conmutación; y que la respuesta del control era lenta comparada con la velocidad del sistema. Es decir, funcionaba, pero el control iba muy por detrás del sistema por lo que se descartó su implementación. El problema de no poder controlar el convertidor con el microprocesador se encontraba en el propio microprocesador elegido, que adolecía de una velocidad de procesamiento insuficiente para poder controlar el sistema. El procesador elegido era un ARM de 8 bits con una velocidad de reloj de 16 MHz.

Como alternativa se buscaron soluciones comerciales en circuitos integrados para implementar convertidores Buck regulados, comprobándose que había una gran variedad de ellos, e incluso productos diseñados específicamente para convertidores aplicados sobre LEDs.

Los grandes fabricantes de integrados como Texas Instruments, National Semiconductor, International Rectifier, etc disponían de varios integrados que satisficieran nuestras necesidades y finalmente se decidió utilizar uno del fabricante National Semiconductor. El elegido fue el integrado LM3406, que es un regulador de corriente con topología Buck para excitación de LEDs de alta potencia, con una corriente máxima de salida de 1,5A, que lo hace idóneo para nuestra aplicación.

Otras características interesantes del dispositivo escogido son: mosfet (i.e. interruptor de potencia) integrado, verdadero valor medio para el control de la corriente a la salida y protección por sobrecalentamiento, que desconecta el convertidor al alcanzarse una temperatura límite. Dado el pequeño encapsulado del integrado, TSSOP14, se hizo necesario el diseño de una placa de circuito impreso para poder utilizarlo adecuadamente y según las especificaciones del fabricante.

3.3.1.1.- Diseño del control del convertidor empleando el integrado LM3406

El integrado seleccionado se presenta en un empaquetamiento tamaño TSSOP de catorce pines más uno de disipación térmica en la parte inferior del componente como se muestra en la ilustración siguiente.

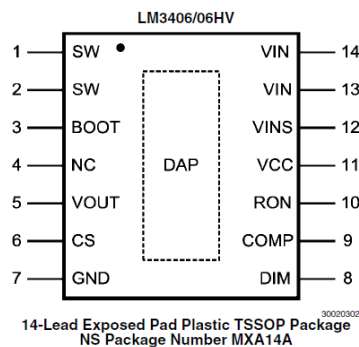


Ilustración 5.- El integrado LM3406

El circuito completo para implementar el convertidor se muestra en la Ilustración 6:

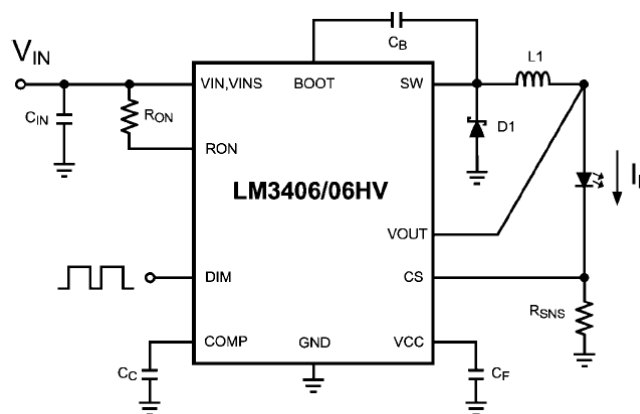


Ilustración 6.- Circuito del convertidor controlado con LM-3406

Para definir los componentes que forman el convertidor hay que determinar los siguientes parámetros de funcionamiento del mismo.

- Tensión de entrada y salida del convertidor, V_{IN} y V_O .
- Frecuencia de conmutación, f_{OSC} .
- Corriente por el LED, I_{LED} .

3.3.1.1.1.- Tensión de entrada y salida del convertidor

En las especificaciones generales del sistema se ha definido que el sistema debe alimentarse mediante una fuente de laboratorio con una tensión de entrada fija y estable, y que el sistema pudiera manejar LEDs y arrays de LEDS de varias potencias y corrientes. Por ello, se fija la tensión de entrada en 24 Voltios como punto de partida del diseño del convertidor. En cuanto a la tensión de salida del convertidor está limitada por la siguiente ecuación:

$$V_{O_{max}} = V_{in} \times (1 - f_{osc} \times T_{OFF_{min}})$$

Ecuación 2.- Tensión máxima de salida del convertidor

Dónde V_{in} es la tensión de entrada al convertidor, 24 Voltios, f_{osc} es la frecuencia de conmutación del convertidor y $T_{OFF_{min}}$ es el tiempo mínimo en que el interruptor S puede estar abierto, este tiempo es una restricción propia del circuito integrado y tiene un valor de 230 ns. Como se verá más adelante se diseñará el convertidor para que conmute a altas frecuencias (del orden de 500KHz) para minimizar el tamaño de los componentes, con lo que la tensión de salida máxima, en función de estos parámetros es de 21,24V, suficiente para alimentar un array de 5 HBLEDs en serie. Además de este dato conocemos el ciclo de trabajo máximo del convertidor D aplicando la Ecuación 3, que se sitúa en un 88,5%.

$$D = \frac{V_O}{V_{in}}$$

Ecuación 3.- Ciclo de trabajo del convertidor

3.3.1.1.2.- Frecuencia de conmutación del convertidor

En primer lugar se determinó el que el convertidor operase a una frecuencia alta para poder minimizar el tamaño y coste de componentes externos (principalmente la bobina L1), ya que cuanto mayor es la frecuencia de conmutación del interruptor S, menor es la inductancia de la bobina necesaria para implementar el convertidor, estando la inductancia de una bobina directamente relacionada con el tamaño (número de espiras y diámetro de estas) de la misma, tal como se muestra en la Ilustración 7.

$$L = 9,87 \times 10^{-7} \times \mu_r \times \frac{N^2 \times d^2}{\sqrt{h^2 + d^2}}$$

Ecuación 4.- Inductancia y tamaño de la bobina

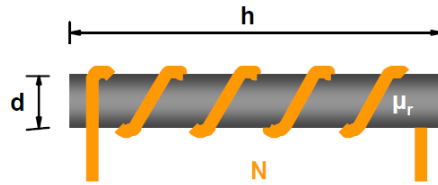


Ilustración 7.- Inductancia de la bobina

El integrado seleccionado controla siempre el convertidor en modo de conducción continua, es decir, la bobina almacena energía durante el tiempo en que el interruptor (ver S en la Ilustración 3) está cerrado y la entrega a la carga durante el tiempo en que S está abierto, de este modo, la bobina siempre está absorbiendo o cediendo energía, no tiene tiempos muertos, lo que asegura una corriente continua por el LED.

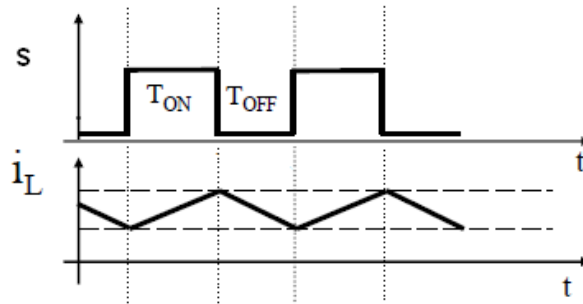


Ilustración 8.- Modo de conducción continua

En la práctica el integrado LM3406 lo que trata de hacer para controlar el convertidor es mantener constante el tiempo que el interruptor está cerrado, T_{ON} , y dependiendo de las tensiones de entrada y salida del convertidor, alarga o acorta el tiempo que el interruptor S está abierto, T_{OFF} . Este modo de control, produce un cambio en la frecuencia de conmutación que mantiene el convertidor en modo de conducción continua.

3.3.1.1.3.- Cálculo de los componentes del convertidor

Dada la aplicación, el convertidor debe ser flexible en cuanto a su punto de funcionamiento. Se marcó como punto de partida para el diseño del hardware las siguientes especificaciones:

- Frecuencia de conmutación: 500KHz.
- Corriente máxima suministrada al LED: 1.5A.
- Número de LEDS en serie: de 1 a 5.
- Tensión de entrada al convertidor: 24 V.

Con estos datos de partida comenzamos a calcular todos los componentes del convertidor basado en el integrado LM3406

Cálculo de R_{on}

Para el cálculo de este componente se tomará como frecuencia de oscilación 500 KHz y una tensión de salida media, dentro de las posibles, correspondiente a 3 LEDS en serie, que es $V_o \approx 12V$. Para ello aplicamos la fórmula facilitada por el fabricante en la hoja de características del integrado:

$$R_{on} = \frac{(D - f_{osc} \cdot 1.75 \cdot 10^{-7}) \cdot (V_{in} - 1.5)}{9.92 \cdot 10^{-12} \cdot f_{osc} \cdot (V_o + 0.65)}$$

Ecuación 5.- Cálculo de R_{ON}

De esta ecuación se puede determinar el valor de la resistencia externa en función de la frecuencia de conmutación del convertidor y de la relación entre la tensión de salida y de entrada del convertidor.

A través de esa fórmula se determinó que el valor de R_{on} para el diseño del driver debía ser de $143k\Omega$, valor comercial en la escala EIA E96 (tolerancia 1%).

Comprobamos que este valor de R_{on} permite operar al integrado dentro de sus valores de funcionamiento verificando el valor de T_{ON} utilizando la ecuación siguiente:

$$T_{ON} = \frac{9.92 \cdot 10^{-12} \cdot (V_o + 0.65) \cdot R_{on}}{(V_{in} - 1.5)} + 1.75 \cdot 10^{-7}$$

Ecuación 6.- Cálculo de T_{on}

Comprobamos que, en este caso central, T_{ON} y el de T_{OFF} son de 972ns, siendo este mayor que el mínimo que permite el integrado, que es de 280ns para T_{ON} Y 230ns para T_{OFF} .

Utilizando las ecuaciones 5 y 6, podemos comprobar que los valores de T_{ON} y T_{OFF} obtenidos son válidos para todos los casos de funcionamiento previstos, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Nº LEDs	V_o (V)	f_{osc} (kHz)	T_{ON} (ns)	T_{OFF} (ns)
1	4	355	468	2341
2	8	462	720	1441
3	12	514	972	972
4	16	544	1225	612
5	20	564	1477	295

Tabla 2.- Cálculos del convertidor. Tiempos de conmutación

3.3.1.1.3.- Corriente por el LED

Otro parámetro de diseño del convertidor es el valor de la corriente que debe alimentar el LED y que ha de ser seleccionable desde la CPU. El modo en que el LM3406 limita la corriente hacia la carga es mediante el uso de un lazo de realimentación de la corriente a la salida del convertidor. La medida de la corriente se implementa colocando en serie con el LED una resistencia (ver R_{SNS} en el esquema de la Ilustración 9) que muestrea la corriente que da el convertidor, transformándola en una tensión que se introduce en el integrado a través del pin CS (pin "Current Sense" ver Ilustración 6). El valor de la resistencia se calcula a través de la ecuación siguiente.

$$R_{sns} = \frac{0.2}{I_{LED}}$$

Ecuación 7.- Corriente del convertidor

Dónde I_{LED} es la corriente que atraviesa el LED y 0.2 es una tensión de referencia del integrado, que internamente se compara con el valor medio de la tensión que haya en el pin CS, para actuar en el ciclo de trabajo y frecuencia de conmutación del mosfet integrado que actúa como interruptor.

En principio, atendiendo a la Ecuación 7, el circuito diseñado trabajaría a un valor de corriente constante, fijado por el valor de R_{SNS} escogido. Como, en nuestro caso, la corriente del convertidor ha de ser variable y seleccionable desde el PC se pensó en controlarla sirviéndonos de un amplificador operacional y un conversor DAC en el bloque de acondicionamiento y control. Se pensó en utilizar un amplificador operacional como amplificador del error entre una tensión de consigna (generada en el bloque de acondicionamiento y control a partir de las instrucciones recibidas desde el PC a través de la CPU local) y la tensión proporcional a I_{LED} obtenida en R_{SNS} . La salida de este amplificador de error, se aplica al pin CS del integrado LM3406 para poder así seleccionar una corriente en todo momento desde una consigna en el PC, a través del siguiente circuito mostrado en la Ilustración 9.

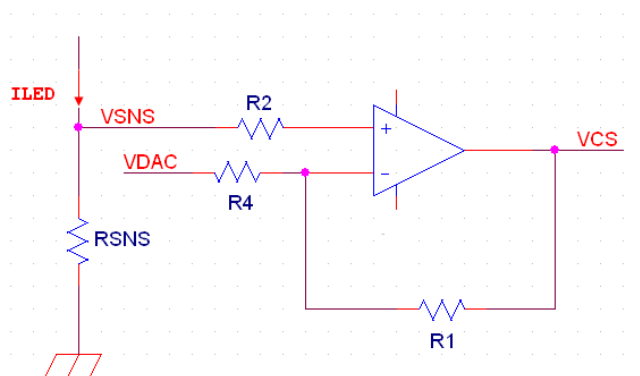


Ilustración 9.- Amplificador de error externo para control de la corriente

La utilización que se ha hecho del amplificador operacional es la de amplificador de doble configuración, inversora para V_{DAC} y no inversora para V_{RSNS} , que tiene como función de transferencia:

$$V_{CS} = V_{RSNS} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_{DAC} \times \frac{R_2}{R_1}$$

Dónde, $V_{RSNS} = I_{LED} \times R_S$ queda a un lado de la ecuación

$$I_{LED} \times R_{SNS} = \frac{V_{CS} + V_{DAC} \times \frac{R_2}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

Si fijamos $R_1 = R_2$ y $R_{SNS} = 0.5 \Omega$, podemos despejar el valor de I_{LED} (en A) en función de V_{CS} y V_{DAC} (dadas en V)

$$I_{LED} = V_{CS} + V_{DAC}$$

Aquí se observa cuál es el mínimo valor de corriente de salida del convertidor que, como se ve en la ecuación anterior, queda fijado por el valor de V_{CS} , que es igual a 0.2 voltios, luego el mínimo valor de corriente que proporciona el convertidor es de 0.2 amperios.

En cuanto al valor máximo de la corriente, éste queda delimitado por la máxima corriente que puede conducir el Mosfet interno del integrado y está fijada en 1.5 amperios según especifica el fabricante en su hoja de características. Por tanto, el valor de V_{DAC} , nunca deberá superar 1,3V.

3.3.1.1.4.- Cálculo de la bobina del convertidor

Para determinar la bobina necesaria para implementar el convertidor debemos tener en cuenta cuál es la función de este elemento, que es precisamente la de filtrar la corriente, ya que tiende a mantener constante la corriente que circula por ella. Esto es debido a que este elemento es capaz de almacenar energía en forma de campo magnético cuando el circuito externo fuerza una corriente por ella, y de devolver esta energía, aportando corriente al circuito cuando la corriente externa se anula. La energía almacenada en una bobina en función del tiempo viene definida por la siguiente ecuación:

$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_L(t)^2$$

Ecuación 8.- Energía almacenada en una bobina

Y la tensión en la bobina es:

$$v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

Ecuación 9.- Tensión en la bobina

Dentro del circuito de un convertidor tipo Buck la bobina opera en régimen permanente. La condición que debe cumplir para funcionar dentro de este régimen es que la tensión media en la bobina debe ser cero voltios a lo largo del tiempo, $v_L(t) = 0$, lo que implica que debe cumplirse además la ecuación siguiente.

$$\Delta i_{L T_{ON}} + \Delta i_{L T_{OFF}} = 0$$

Ecuación 10.- Condición de régimen permanente bobina

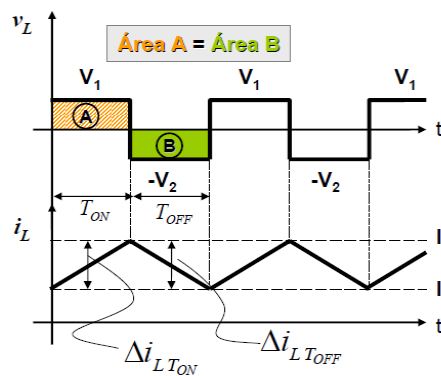


Ilustración 10.- Operación en régimen permanente de una bobina

Atendiendo a lo reflejado en la Ilustración 10, se observa que el flujo de la energía en la bobina es tal, que ésta es absorbida por la bobina durante el tiempo en que el interruptor S está cerrado, T_{ON} , y es cedida durante el tiempo que está abierto, T_{OFF} .

Para el cálculo de la inductancia de la bobina adecuada el fabricante del integrado nos plantea en sus hojas de características una ecuación para definir el rizado de la corriente de salida del convertidor, Δi_L , que lo define como el cuarenta por ciento del valor de la corriente media que deseamos tener a la salida del convertidor. Para este cálculo escogemos el valor de corriente que supone el peor caso y que se sitúa en el máximo de la corriente que el convertidor es capaz de proporcionar, 1.5 A.

$$\Delta i_L = 1.5A \cdot 0,4 = 0.6 A_{P-P}$$

Ecuación 11.- Rizado de la corriente en la bobina

Ahora con este dato vamos a la Ecuación 12, dónde son conocidos los demás parámetros de la ecuación:

- $V_{in} = 24$ Voltios
- $T_{ON} = 972$ nS
- $V_o = 12$ V (3 HBLEDs en serie)
- $\Delta i_L = 0.6 A_{P-P}$

$$L = \frac{V_{in} - V_o}{\Delta i_L} \cdot T_{ON}$$

Ecuación 12.- Cálculo de la bobina del convertidor

Aplicamos la Ecuación 12 que nos devuelve el valor adecuado de inductancia para la bobina que es de 19.4 μ H. El valor de inductancia de una bobina comercial que más se acerca (por encima, para tener un rizado menor que el puesto como límite) es el de 22 μ H.

Ahora debemos calcular para todos los valores de V_o (1, 2, 3, 4, 5 LEDS en serie) cuál es el rizado de la corriente y comprobar si es admisible y no provoca la conducción discontinua en la bobina. Para ello utilizamos la Ecuación 12 nuevamente pero despejando de ella el rizado Δi_L . Únicamente debemos calcular adicionalmente el valor de T_{ON} con cada valor de V_o .

Nº LEDs	V_o (V)	f_{osc} (kHz)	T_{ON} (ns)	$\Delta i_{L\ p-p}$
1	4	355	468	0,425
2	8	462	720	0,523
3	12	514	972	0,530
4	16	544	1225	0,445
5	20	564	1477	0,268

Tabla 3.- Cálculos del rizado de la corriente de salida del convertidor

Como se puede observar el rizado es siempre inferior al 40% del valor de pico de la corriente máxima, que es apropiada para alimentar a los HB LEDS. Incluso para la corriente media de salida mínima prevista de 350mA (para LEDS de 1W) en ningún caso se entraría en modo de conducción discontinua.

Además vemos que el peor rizado se produce para 3 LEDS, comprobamos para este caso la corriente de pico. La corriente de pico es definida como la corriente media, 1.5A, más la mitad de la corriente de rizado.

$$i_{L\ max} = 1.5 + \frac{0.531}{2} = 1.76\ A$$

Este valor será tenido en cuenta en el momento de adquirir la bobina para evitar la saturación del entrehierro y asegurar un correcto funcionamiento de la misma.

3.3.1.1.5.- Cálculo de otros elementos del convertidor

Condensador de entrada C_{IN}

La función de este elemento es la de asegurar una tensión de entrada constante al convertidor. Se calcula su valor mínimo para el peor caso, siendo este cuando el convertidor entrega la máxima potencia, es decir, cuando alimenta 5 LEDS en serie y entrega 1.5 A de corriente.

$$C_{IN} = \frac{I_{max} \cdot T_{ON\ max}}{\Delta V_{IN}}$$

Ecuación 13.- Cálculo de CIN

Aceptando una variación de tensión a la entrada de un 2%, la Ecuación 13 nos devuelve un valor mínimo de $C_{IN} = 4.55\mu F$, el valor comercial del condensador que más se acerca es de $4.7\mu F$.

Los condensadores C_B , C_C y C_F

Los valores elegidos para estos condensadores son los recomendados por el fabricante en la hoja de características:

$$C_B = 22\ nF$$

$$C_C = C_F = 100\ nF$$

DLC Diodo de libre circulación

Este elemento del convertidor tiene como función principal permitir la circulación de corriente por el convertidor durante el tiempo T_{OFF} de cada período. Dada la aplicación ha de ser un diodo de los denominados rápidos (Schottky). Para su elección se debe tener en cuenta la tensión en polarización inversa que admite, su tensión en conducción directa y la corriente que es capaz de conducir.

La mayor corriente en directa que ha de conducir se producirá cuando el ciclo de trabajo D , es menor, ya que el resto del tiempo, $(1-D)$, la corriente circula por el diodo de libre circulación.

$$I_D = (1 - D_{min}) \cdot I_{Max}$$

Ecuación 14.- DLC

Sustituyendo todos los datos en la Ecuación 14, se obtiene una corriente máxima de 1.28 A. Por lo que el diodo elegido debe ser capaz de conducir tal cantidad de corriente.

3.3.2.- Bloque CPU. Selección del interfaz de PC con el sistema

Para satisfacer el segundo requisito de diseño y, una vez elegido el circuito driver, se pasó a solucionar el problema de adquisición de mediciones de parámetros de interés del LED y posterior envío a un PC para su tratamiento y procesamiento digital.

Para este cometido se contempló la posibilidad de hacerlo a través de un kit de desarrollo de un microcontrolador. El escogido fue el de la plataforma ARDUINO, cuyo principal atractivo es que se trata de hardware y software libre y, además, de bajo coste. Entre sus principales características se puede destacar que el microcontrolador es del fabricante ATMEL, en concreto el modelo ATMEGA 1280, de 8 bits, y que en la plataforma de ARDUINO MEGA tiene accesibles 54 entradas / salidas digitales, 4 UARTS y una velocidad de reloj de 16 MHz y un puerto USB, que utilizaremos para la conexión con el PC. Esta plataforma electrónica está

orientada a la creación de prototipos en electrónica y robótica, contando con un gran soporte generado y mantenido por los propios usuarios, que son muchos y están en constante creación y ampliación del conocimiento sobre el microcontrolador y su programación.

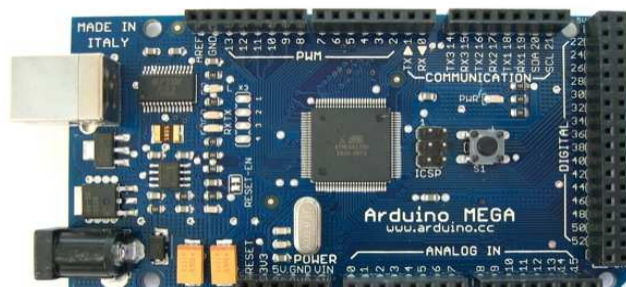


Ilustración 11.- Tarjeta de desarrollo ARDUINO

Con la elección de este soporte se da viabilidad al requisito de la modularidad, ya que en la tarjeta física que soporta el microprocesador se puede acceder fácilmente a todos sus pines y, por ello, permite el apilamiento de tarjetas interconectadas entre sí para futuras ampliaciones del sistema.

3.3.3.- Bloque Acondicionamiento y Control

Como contrapartida, el ARDUINO tiene el inconveniente de ser un poco mediocre en todo, si se compara con otros microcontroladores que son específicos o están optimizados para realizar diferentes tareas. Al ser este un sistema que no está cerrado, si no que queda abierto a futuras ampliaciones y mejoras, se optó finalmente por esta plataforma.

Entre sus faltas, la que más penalizaba al conjunto del sistema es la de sus convertidores ADC que son de sólo 10 bits de resolución y con un máximo de 15 kmuestras/s.

Lejos de descartar el ARDUINO, se pensó en dar una solución a este inconveniente, que fue buscar un integrado para ese propósito específico en el que el ARDUINO no destacaba. Se seleccionó uno de Burr-Brown, ahora TI, que suplía con creces las carencias del ARDUINO y suponía el complemento perfecto para implementar un sistema de adquisición de datos aceptable.

El integrado seleccionado es el AMC 7820, que es un circuito completo de monitorización y control que cuenta con un convertidor ADC de 8 canales con 12 bits de resolución con una velocidad de muestreo de 100 kmuestras/s, tres convertidores DAC de 12 bits de resolución y 9 amplificadores operacionales de precisión. Todo ello se comunica y controla a través de un puerto SPI.

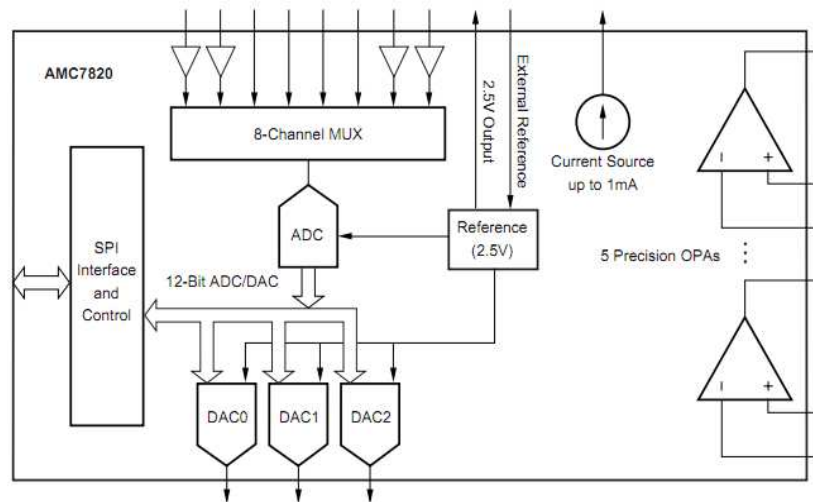


Ilustración 12.- Esquema de bloques funcionales del integrado AMC7820

Dentro de todos los recursos que ofrece el integrado AMC7820, el que más interesa para conseguir los objetivos propuestos, es el que permite digitalizar señales analógicas a través de su conversor analógico – digital (ADC). Dentro de todas las señales analógicas que son interesantes controlar, este proyecto se ha centrado en las provenientes del bloque driver y que dan información acerca de la corriente que alimenta al LED, ya que como se comentó anteriormente una de las principales variables que más afectan a los HBLEDs es la corriente y es por ello que se destinarán gran parte de los recursos del sistema a cuantificarla.

Adicionalmente se ha previsto, y se han destinado recursos para ello, el poder cuantificar el espectro de la luz emitida por el LED a través de fotodiodos, de cara a satisfacer todas las indicaciones y métodos recogidos en las normas IESNA.

3.3.4.- Bloque fuente de alimentación

Como se mencionó anteriormente, este bloque tiene como función proporcionar una tensión adecuada y regulada a todos los componentes del sistema. Estas tensiones quedan definidas en los requerimientos de las hojas técnicas del fabricante de los integrados que forman el sistema y en las reglas de diseño que se establecieron anteriormente. Estas tensiones por bloque son:

- CPU: 5 V @ 500mA
- Acondicionamiento y control: 5 V @ 100 mA
- Driver: 24 V @ 1.25 A

Las funciones principales de este bloque son las de alimentar y proteger el sistema contra cortocircuitos, contra incorrecta polarización de la alimentación y contra sobrecorrientes por funcionamiento anómalo del sistema.

Para garantizar estas características se ha dotado a este bloque de una fuente regulada integrada con una tensión de entrada de 24V, que proporciona una tensión de salida



estabilizada y regulada de 5 V con un rizado máximo de 8 mV_{pp} . Esta fuente de alimentación se ha implementado mediante el circuito integrado LMZ14203 del fabricante National Semiconductor, aplicando para ello todas las recomendaciones para su adaptación conforme a los requisitos del sistema, y que, pueden ser consultadas en la hoja de características del componente (Ver anexos al proyecto).

Adicionalmente, se ha dotado a la electrónica de este bloque de un fusible re-armable y diodos polarizados convenientemente, de tal manera que protegen al circuito de una incorrecta conexión del circuito. Estas protecciones han sido implementadas mediante la colocación en serie con la entrada principal de energía al sistema de un fusible re-armable tipo POLY SWITCH que desconecta la alimentación ante sobre corrientes de valor superior a 1.5 A en un hipotético caso de cortocircuito. Para la protección contra una incorrecta polarización del circuito (polarización inversa), se ha colocado, en paralelo con la masa del circuito un diodo de barrera Schottky específico para su aplicación en la protección contra inversión de polaridad de circuitos de alimentación.

3.4.- Diseño y fabricación de la placa de circuito impreso

A continuación, se describe el diseño completo de la placa de circuito impreso que implementa el sistema, desde el diseño esquemático de los circuitos, al diseño físico de los mismos para la fabricación de la placa de circuito impreso (PCB).

3.4.1.- Diseño esquemático del circuito para realizar la PCB

En este apartado se describen los bloques funcionales que implementan la electrónica del sistema. El software de CAD empleado es el OrCAD de Cadence en su versión 9. Se ha diseñado el circuito mediante el uso jerárquico de bloques funcionales que facilitan el desarrollo electrónico de esquemas de circuitos, ya que, al poder diseñar bloque a bloque de modo independiente cada parte del circuito, se obtienen esquemas claros que son fundamentales para los trabajos de diseño del PCB y su puesta en marcha posterior.

Los esquemas completos, correspondientes al diseño detallado descrito en los puntos precedentes, se encuentran en la sección de Planos del presente Proyecto. Aquí nos limitamos a reproducir los aspectos más relevantes de cada bloque.

Dentro del sistema se pueden diferenciar varios bloques funcionales que componen el conjunto, y son:

➤ **Bloque CPU**

Este bloque alberga la interconexión del PCB que soporta el driver con el módulo ARDUINO (ver Ilustración 11.- Tarjeta de desarrollo ARDUINO). Al estar concebido el sistema para ser ampliable, cuenta con unos conectores que permiten apilar diversas placas sobre una CPU ARDUINO común. A través de estos conectores se interconecta eléctricamente el sistema con el ARDUINO.

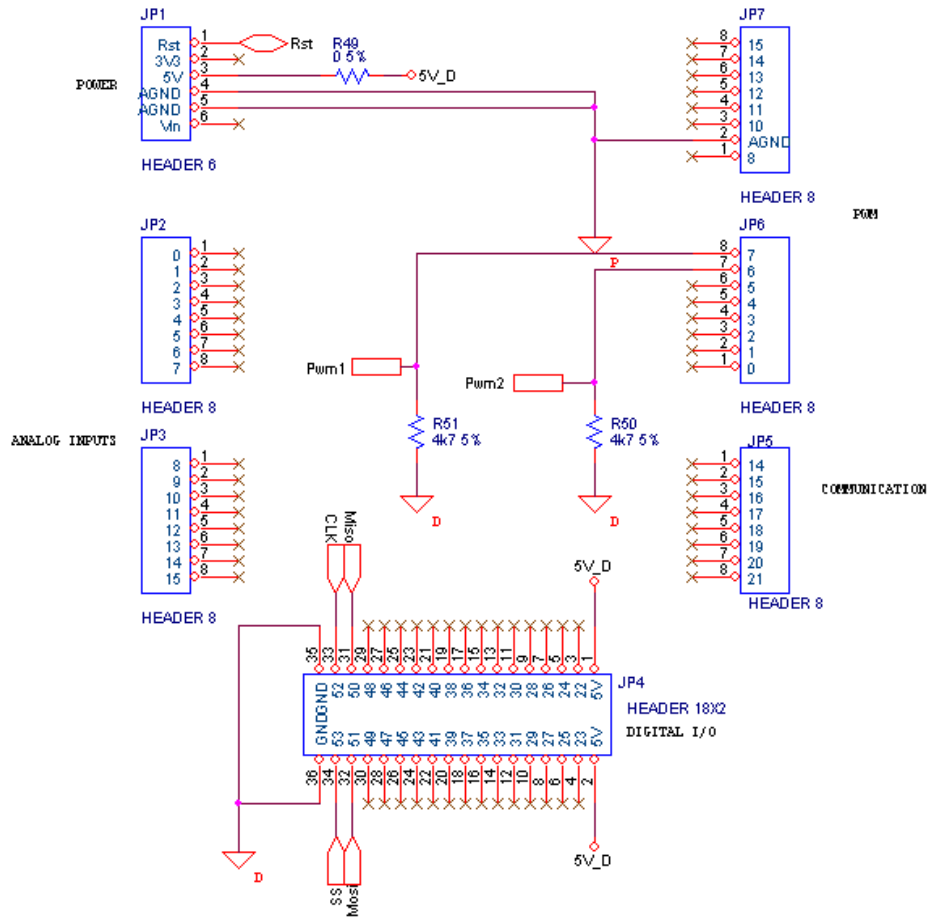


Ilustración 13.- Circuito bloque CPU

➤ Bloque ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL

Este bloque se ha implementado con el integrado AMC 7820, responsable principal de la digitalización de las magnitudes analógicas observables del sistema, como la corriente por el LED y la descomposición espectral de la luz emitida por este. También está encargado de transmitir las consignas enviadas desde el interfaz del PC local al driver. Algunas de estas funcionalidades no están implementadas en el sistema aún, ya que son ampliaciones y mejoras futuras que se han previsto con antelación.

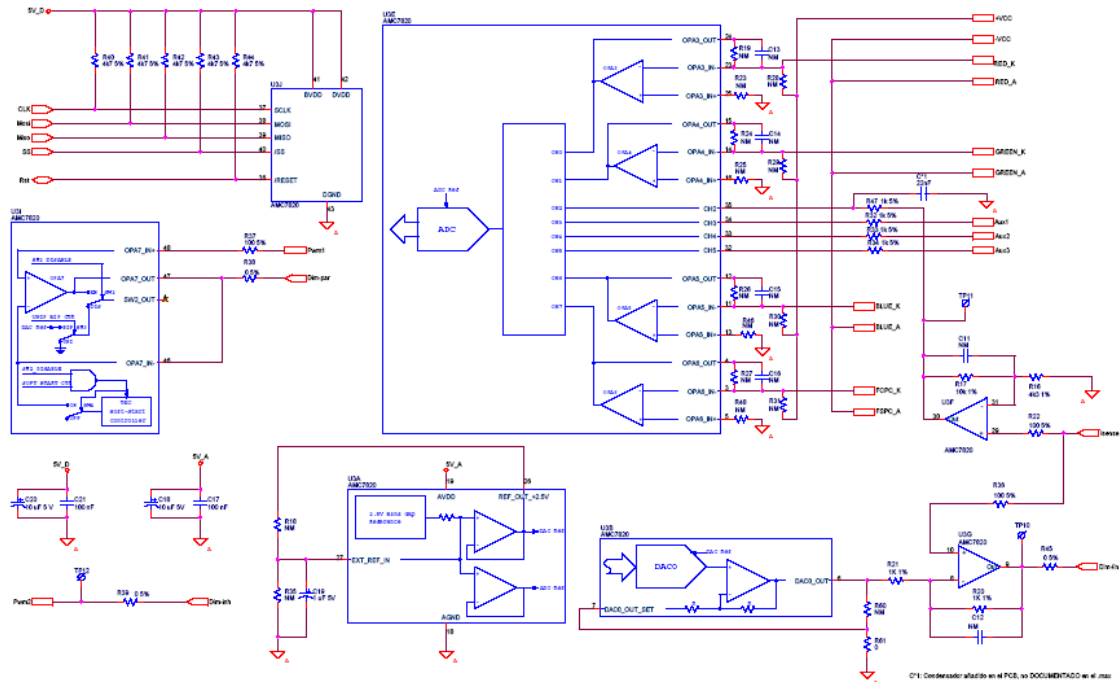


Ilustración 14.- Circuito de Bloque ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL

➤ **Bloque DRIVER**

Este bloque es el que implementa el circuito excitador completo, incluido el control del mismo, con el integrado LM3406. Adicionalmente este bloque contiene funcionalidades extra como la posibilidad de oscurecer el LED a través de un MOSFET colocado a modo de puente en paralelo con el LED.

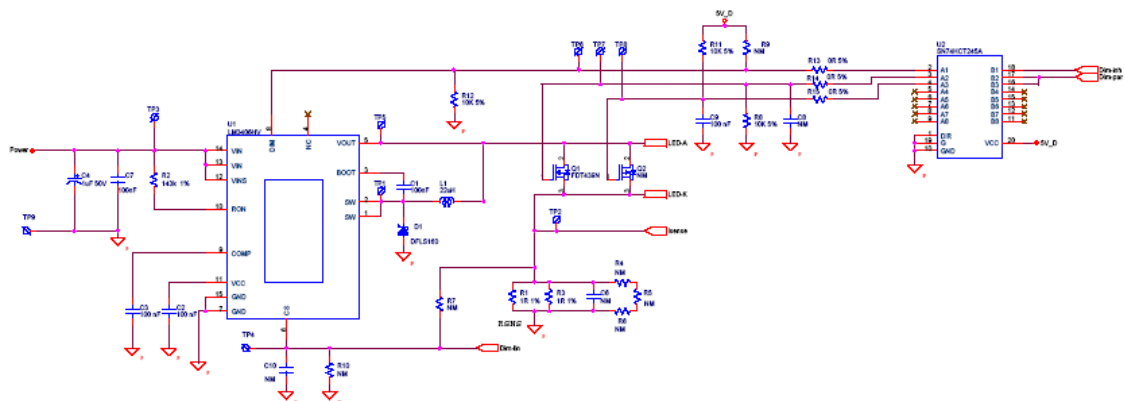


Ilustración 15.- Circuito de Bloque DRIVER

➤ Bloque POWER (Fuente de Alimentación)

Este bloque contiene los circuitos que aseguran una alimentación correcta de todos los bloques del sistema. Este bloque también cuenta con las protecciones básicas contra sobre-corriente y cortocircuito, así como con protección ante una polarización inversa del sistema.

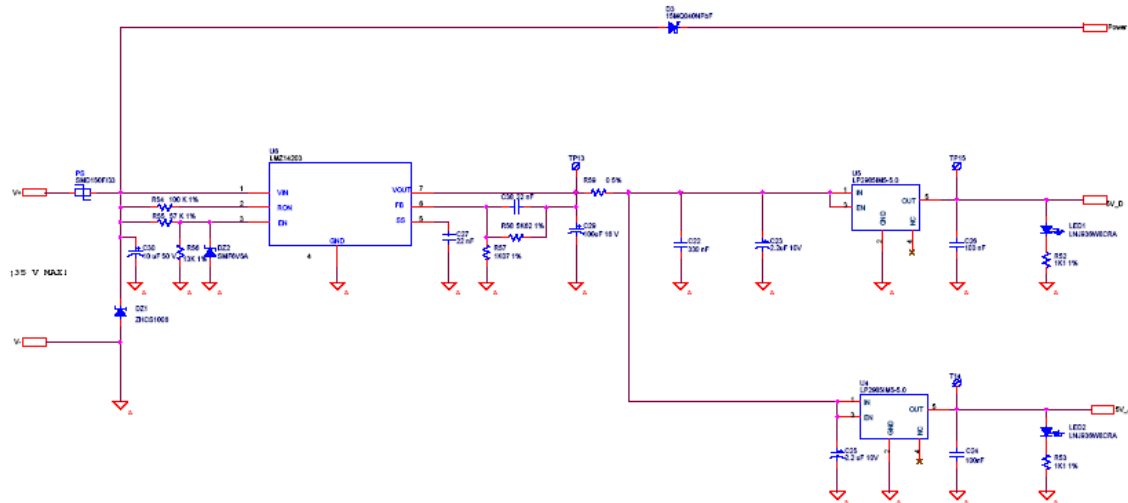


Ilustración 16.- Circuito de Bloque POWER

3.4.2.- Consideraciones en el diseño de placas de circuito impreso

Para diseñar circuitos impresos y que, posteriormente, el circuito realice la función deseada y no se comporte de otro modo desconocido y no deseado, se han de tener en cuenta varios factores. En primer lugar se ha de hacer una minuciosa lectura de la hoja de características del fabricante de todos los componentes del circuito en búsqueda de las recomendaciones que hace el fabricante sobre el montaje de su componente en un circuito impreso.

Estas recomendaciones suelen contener recomendaciones sobre la huella del componente, sobre el tamaño de las pistas que llegan o salen a o desde los pines del componente, e incluso sobre el lugar óptimo de ubicación dentro del PCB para evitar interacciones con otros componentes del circuito. También suelen recomendar, en el caso de circuitos integrados la ubicación de los elementos pasivos que deben acompañar al circuito integrado para que desempeñe su función de un modo correcto.

El no cumplir con dichas recomendaciones, suele tener como resultado un comportamiento anómalo de los circuitos, lo que lleva a tener que desechar el PCB y tener que diseñar otro. Una buena base de partida para comenzar un diseño de PCB puede ser examinar las notas de aplicación y placas de evaluación que los fabricantes suelen ofertar con los circuitos que comercializan, que contienen ejemplos de aplicaciones donde es probable encontrar recomendaciones e información valiosa para el diseño del circuito de nuestra propia aplicación.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta en todos los circuitos impresos más aún en aquellas aplicaciones como la nuestra, en la que coexisten conmutaciones de corrientes significativas a frecuencias relativamente elevadas ($\approx 1A@0,5MHz$) con digitalización de medidas analógicas en las que no se quiere degradar la resolución básica del conversor utilizado (en nuestro caso 12bits), es el rutado adecuado de las pistas y la colocación de planos de masa y de alimentación adecuados.

Los planos de masa y alimentación deben ser uniformes para que en los pines de alimentación de los componentes las tensiones sean estables y estén libres de interferencias.

Es muy importante que los planos de alimentación queden cerrados por planos de masa y en general que las conexiones a masa deben ser de tal manera que las pistas queden con la menor longitud para minimizar la impedancia de las mismas con la frecuencia.

En el diseño del PCB del sistema se va a optar por una tecnología de fabricación a cuatro capas y clase cuatro, cuya restricción fundamental es una anchura de pista, separación entre pistas y entre estas y pads de 8 mils (8 milésimas de pulgada, esto es, 0,20mm). Esta restricción, junto con el resto del conjunto de requisitos característicos propios de la clase cuatro, han sido tenidos en cuenta para el diseño y rutado del PCB.

3.4.3.- Técnicas de diseño de placas de circuito impreso

Inductancia en Vías

La vía es un pequeño orificio metalizado que establece un punto de conexión eléctrica entre pistas y/o planos de dos o más capas, en nuestro caso, la capa TOP, la capa BOTTOM y las dos capas internas, ya que no emplearemos vías enterradas ni vías ciegas. En ellas, se forma una inductancia parásita. En un diámetro determinado (d) la inductancia aproximada (L) de una vía a una altura de (h) se puede calcular de la siguiente manera:

$$L \approx \frac{h}{5} \left(1 + \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \right) nH$$

Ecuación 15.- Inductancia en vías

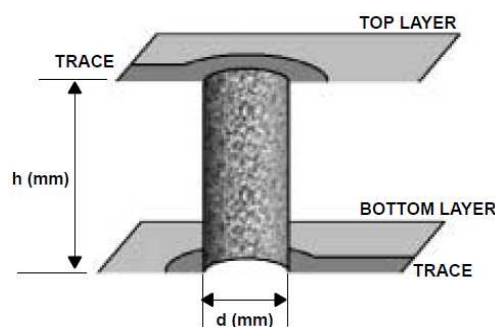


Ilustración 17.- Vías en PCB

Se ha de tener en cuenta que las inductancias de las vías combinadas con capacidades parásitas pueden formar circuitos resonantes (que producirían oscilaciones en los flancos de conmutación) o paso bajo (que alargarían los tiempos de subida). La autoinducción de una vía es lo suficientemente pequeña para que resuenen en el rango de GHz, pero las inductancias de varias vías en serie se suman, reduciendo la frecuencia de resonancia. Se debe evitar colocar varias vías en serie en una pista de señal de un circuito de alta velocidad analógica, así que el diseño se debe hacer de tal forma que el mayor número de líneas de señal sean rutadas en la capa superior de la PCB sin saltos de cara mediante vías en la medida de lo posible.

Bobinas de Choke

Una bobina de choke es un inductor diseñado para tener una reactancia muy grande a una frecuencia o rango de frecuencias determinadas. Una bobina de choke se emplea para impedir el paso de una parte de un circuito a otra de la corriente alterna, al mismo tiempo que se deja pasar la corriente continua, impidiendo la propagación de ruidos e interferencias por las líneas de alimentación DC.

Condensadores

Otra medida habitual en el diseño de placas es el uso de condensadores de desacoplo o “bypass”. Los condensadores de desacoplo se encargan de eliminar la energía de radiofrecuencia generada en los planos de alimentación por los componentes de alta frecuencia, y proporcionan una fuente DC localizada para componentes, a la vez que, actuando como reservas de energía locales, reducen los picos de corriente propagados a través de la placa cuando un componente presenta un pico de consumo.

Los condensadores de capacidades bajas ($\approx nF$) suelen ser usados para eliminación de los parásitos de alta frecuencia, mientras que los condensadores más grandes estabilizan variaciones de tensión a baja frecuencia ($\approx \mu F$).

Cada condensador tiene una inductancia serie asociada a su capacidad, lo que limita su comportamiento capacitivo hasta su frecuencia de auto-resonancia, por encima de la cual el condensador se vuelve inductivo (su impedancia aumenta con la frecuencia), lo cual elimina el desacoplo en RF. Si ponemos condensadores en paralelo la inductancia total disminuirá mientras que la capacidad total aumenta.

Cuando se usan condensadores de desacoplo o “bypass” se debe tener en cuenta que el ruido generado se deriva a tierra, por tanto, es deseable poner estos condensadores lo más cerca posible de los pines de alimentación del integrado, con una conexión a tierra de mínima inductancia (lo ideal es una o varias vías en paralelo, directamente del pin del condensador al plano de masa).

También se debe tener en cuenta que los condensadores tienen diferentes dieléctricos, con diferentes rangos de frecuencias de trabajo, como se recoge en la siguiente tabla:

TYPE	MAX FREQUENCY
Aluminum Electrolytic	100 kHz
Tantalum Electrolytic	1 MHz
Mica	500 MHz
Ceramic	1 GHz

Tabla 4.- Frecuencias de los condensadores atendiendo al material de fabricación

Los condensadores cerámicos tienen mejores características a alta frecuencia y funcionan en una amplia gama de frecuencias. Los condensadores electrolíticos (alta capacidad) pueden complementar a los cerámicos, ya que ofrecen poca impedancia a frecuencias bajas. En la Ilustración 18, puede verse cómo la frecuencia de auto-resonancia de un condensador cerámico es muy superior a la de uno electrolítico, que a su vez presenta una menor impedancia a las frecuencias bajas.

Por este motivo, en función del rango de frecuencias en que tenga que funcionar el circuito diseñado se emplean combinaciones de condensadores en paralelo, que actúan como desacoplos efectivos en todo el rango de frecuencias necesario.

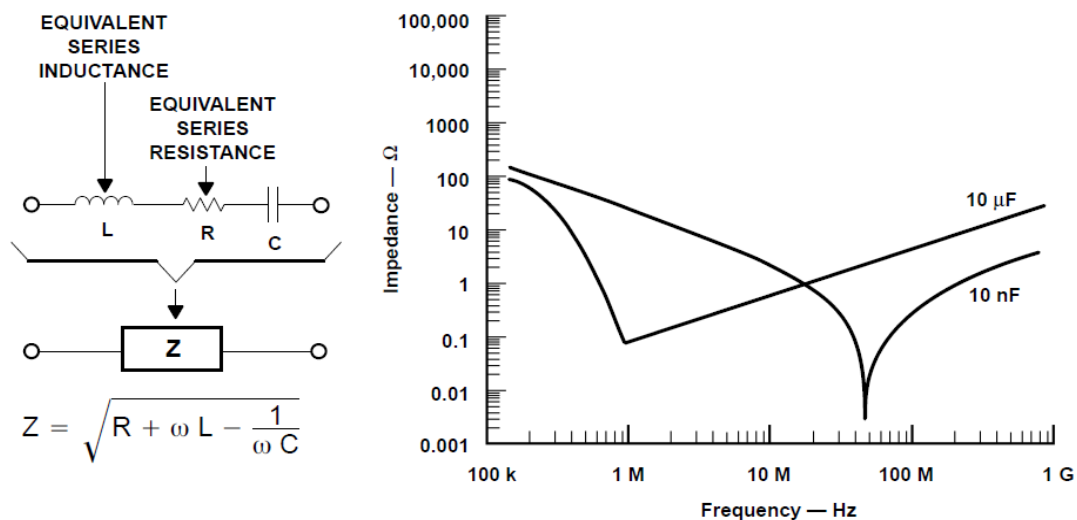


Ilustración 18.- Frecuencia de auto - resonancia de condensadores

Plano de masa

El plano de masa es el camino de retorno para todas las señales del circuito, incluyendo la distribución de energía. Puede ser concebido como homogéneo sólo en circuitos de corriente continua estática, para el resto de casos, el plano nunca será homogéneo. Esto a efectos prácticos significa que todas las tierras no son iguales. En nuestra aplicación cabe distinguir entre masa digital, masa analógica y masa de potencia.

Si coexisten varios circuitos que usan el plano de masa para señales diferentes, las corrientes de retorno comunes pueden generar interferencias de las señales de mayor intensidad (en nuestro caso, las conmutaciones en el circuito de excitación) sobre las más débiles (la medida de corriente por el LED que se digitaliza mediante un ADC de 12bits).

Se deben crear los planos de masa lo más homogéneos que sea posible, realizando vías sólo cuando sea necesario y provocar un camino de retorno de las corrientes rápido y directo. Es conveniente mantener los retornos de los circuitos de potencia, digitales y analógicos lo más separados que nos sea posible.

En placas multicapa, se pueden separar en distintas capas las alimentaciones y tierras para circuitos digitales y analógicos.

Una última consideración, ésta de índole totalmente práctica, es que, al tratarse en nuestro caso de un prototipo relativamente sencillo, conviene usar las dos capas internas para planos de masa y alimentación, dejando todas las pistas de señal por las dos capas externas y por tanto accesibles. Esto facilita la realización de modificaciones en las conexiones que puedan resultar necesarias.

Teniendo en consideración todo lo anterior, se ha diseñado el circuito impreso que se muestra en las ilustraciones Ilustración 19 a la Ilustración 24. Si se observan las ilustraciones Ilustración 21 a la Ilustración 23, puede verse como se ha dividido el PCB en tres secciones, de izquierda a derecha el bloque de alimentación el driver y el bloque de control, con sus tres planos de masa separados, de forma que se independizan las zonas en que se conmutan corrientes elevadas de aquellas en que se trabaja con señales débiles.

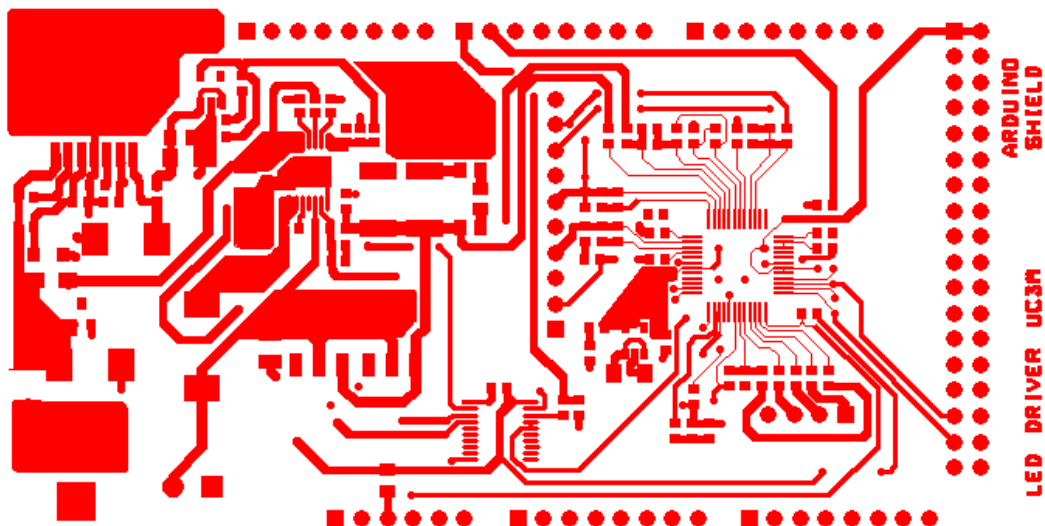


Ilustración 19.- Capa TOP

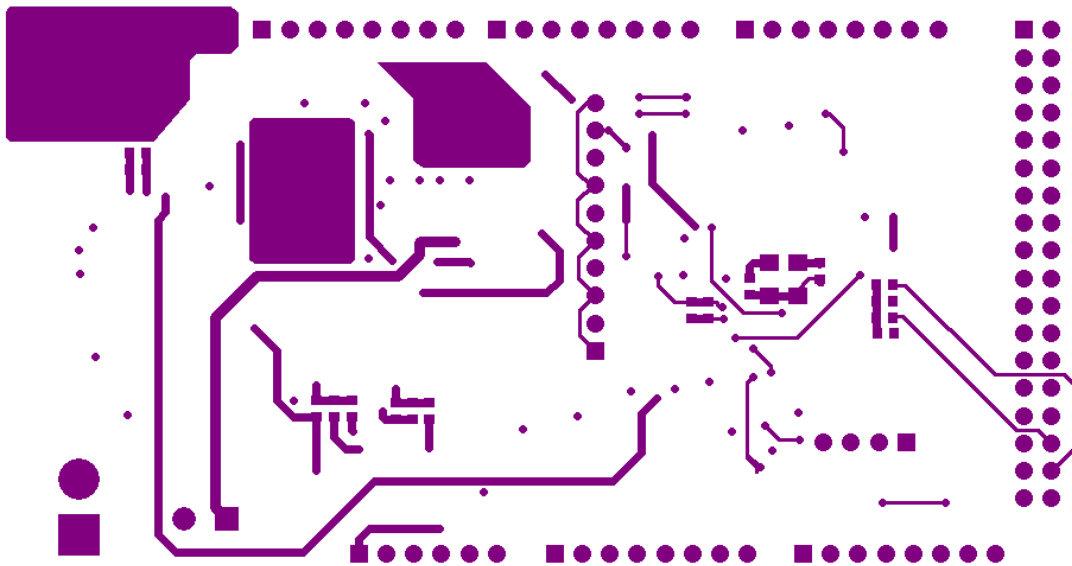


Ilustración 20.- Capa BOTTOM

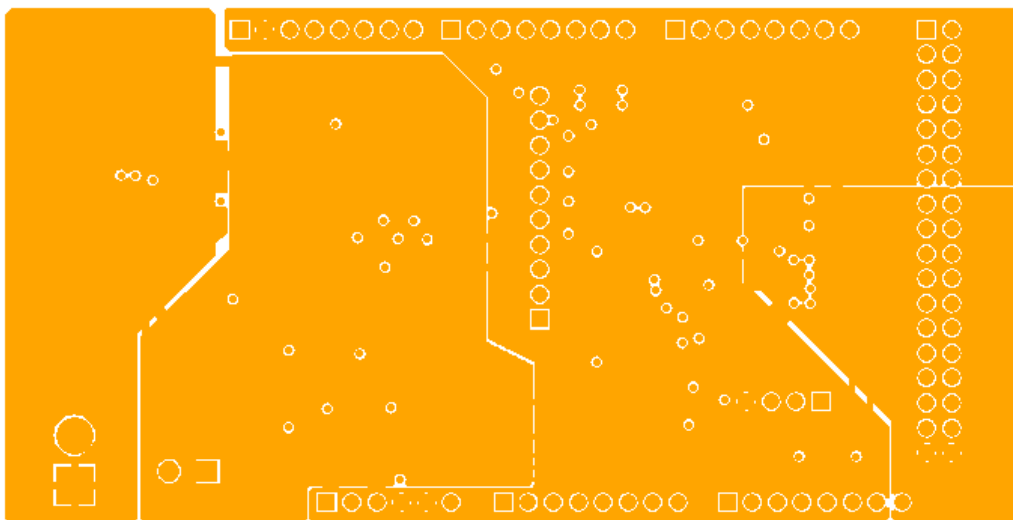


Ilustración 21.- Capa GND 1

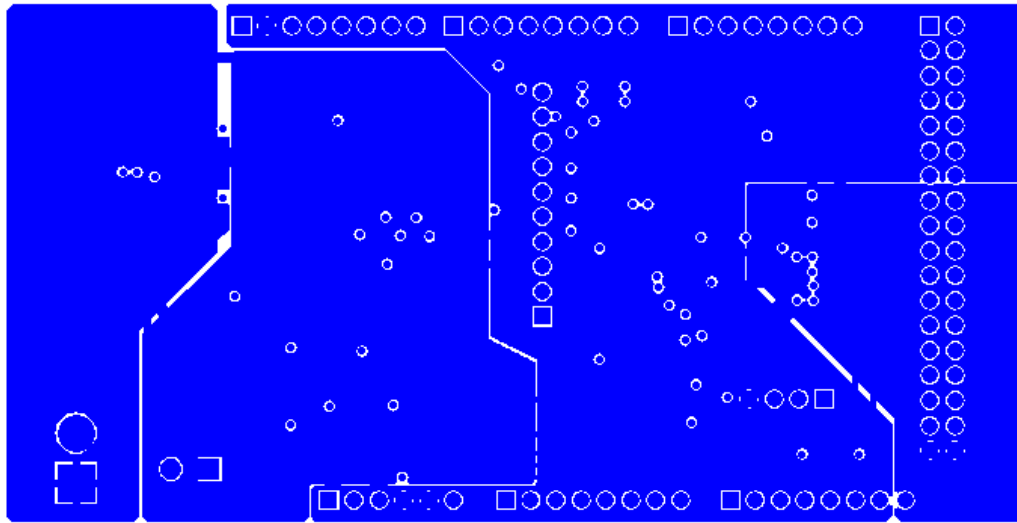


Ilustración 22.- Capa GND 2

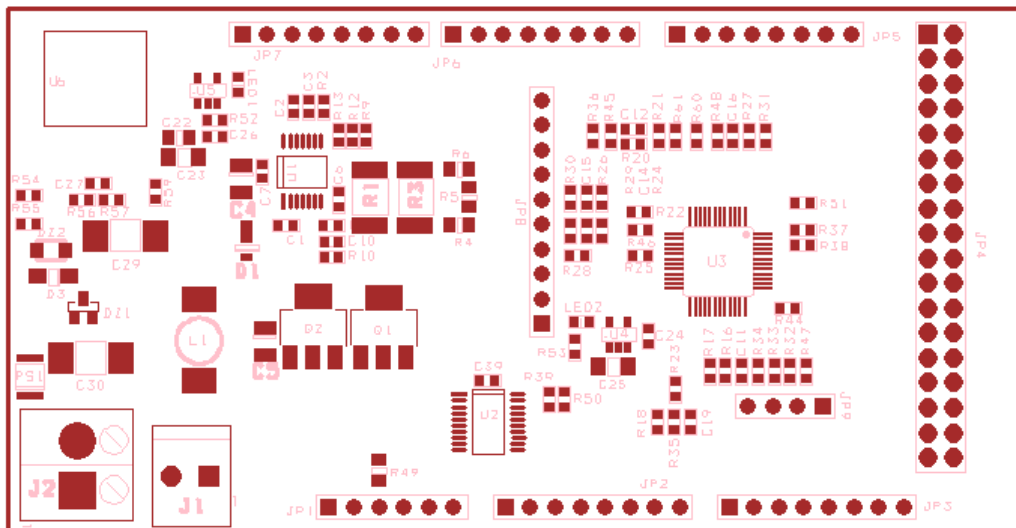


Ilustración 23.- Situación de componentes

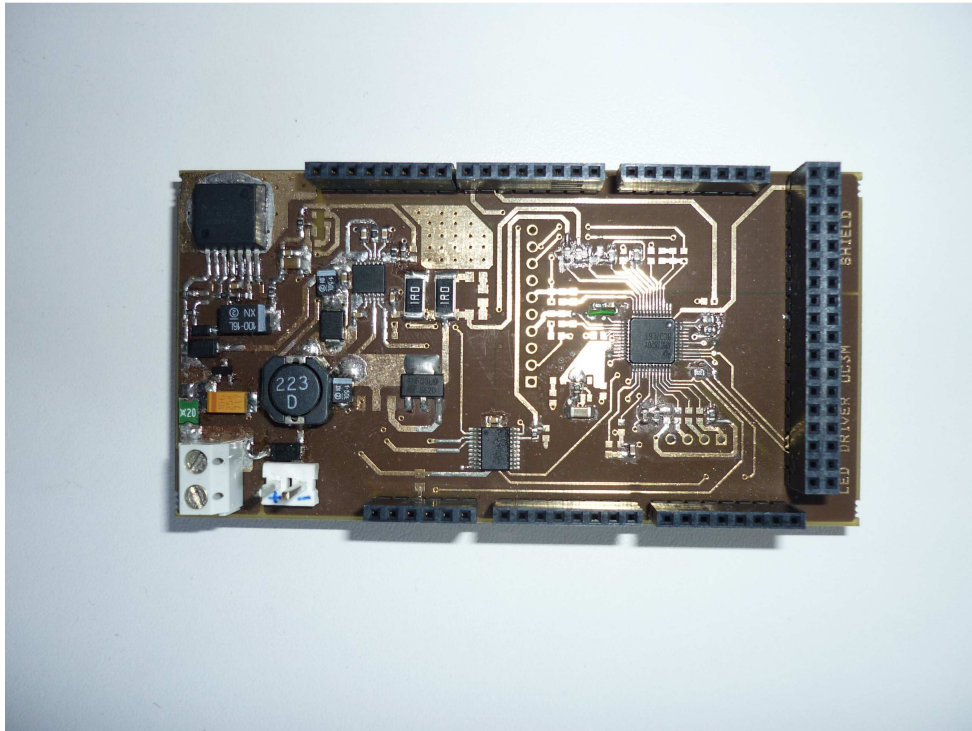


Ilustración 24.- Vista de la placa ya fabricada y montada

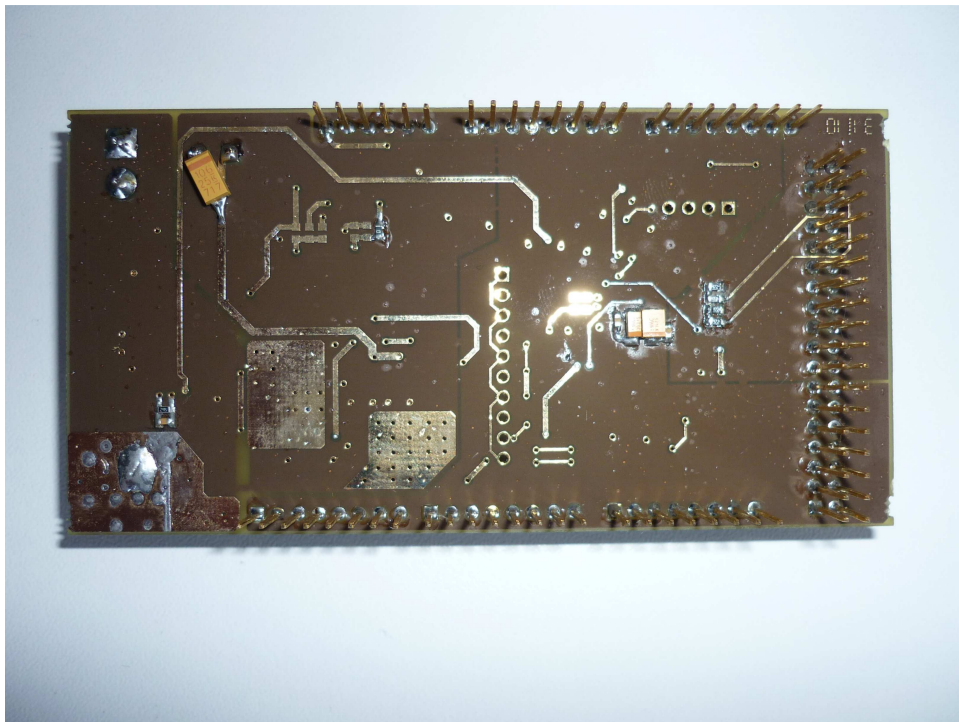


Ilustración 25.- Cara anterior de la placa fabricada

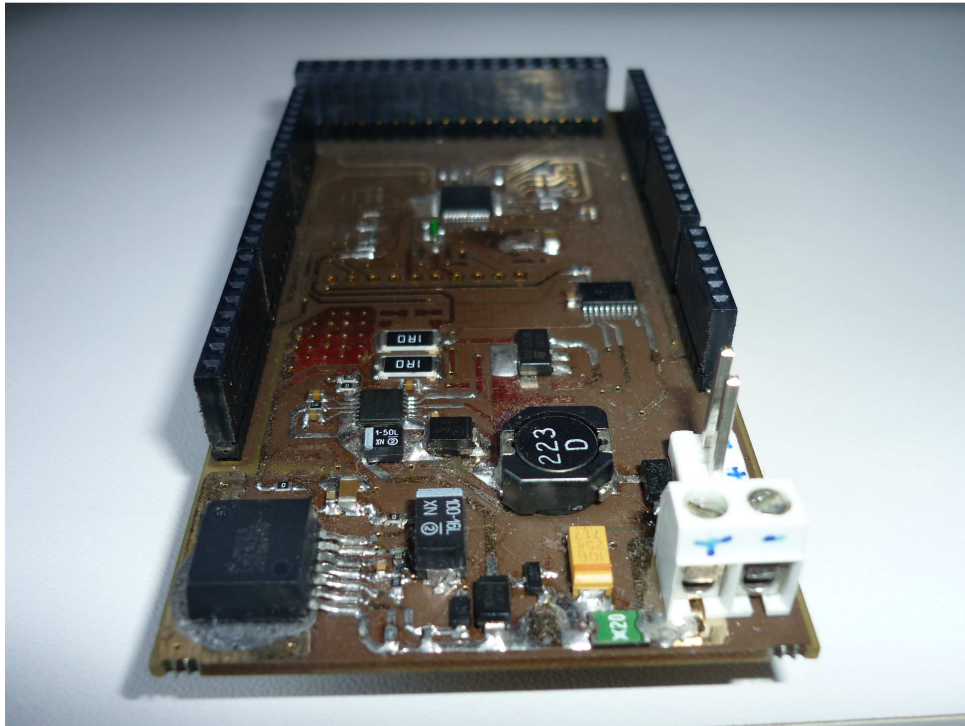


Ilustración 26.- Vista de la cara de componentes de la placa

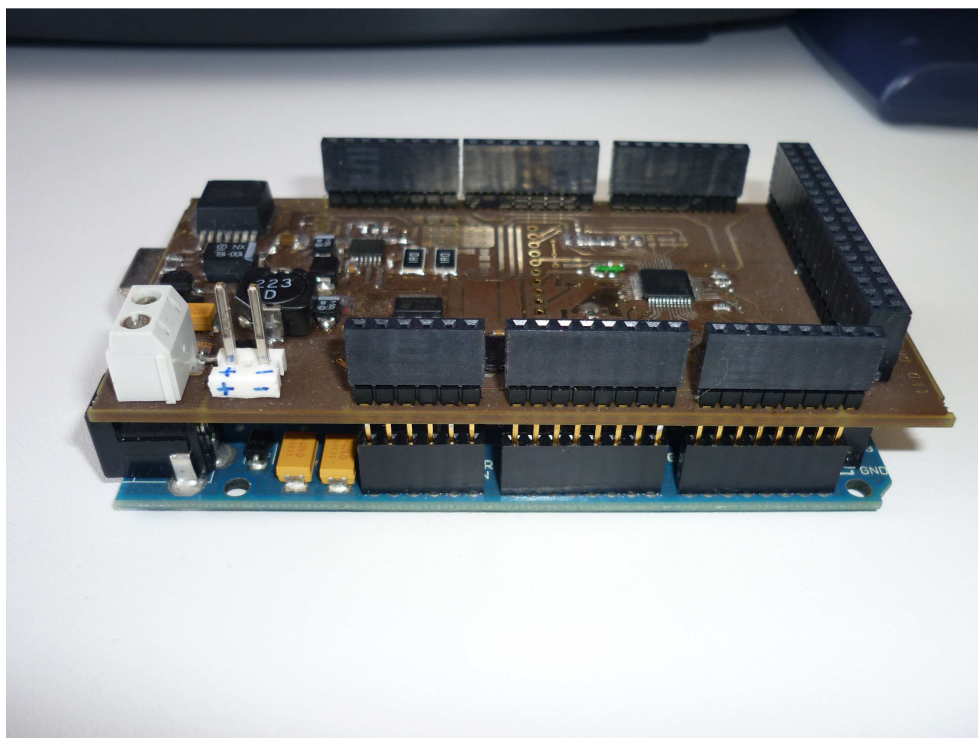


Ilustración 27.- Vista lateral del conjunto apilado

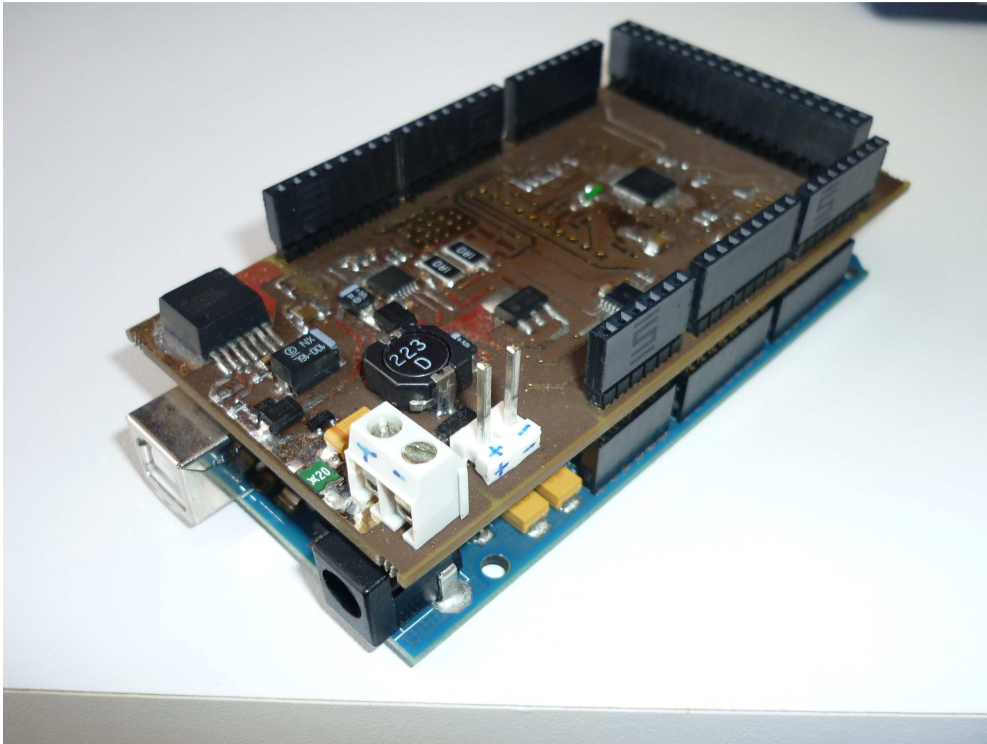


Ilustración 28.- Vista general del conjunto



Capítulo 4.- Diseño del Software

El diseño del Software del proyecto se divide en dos partes: la correspondiente a la programación del microcontrolador del ARDUINO y la correspondiente a la programación de una consola ejecutable desde el PC.

4.1.-Diseño del programa del microcontrolador del bloque CPU

4.1.2.- Introducción

En la programación del microcontrolador se ha utilizado el programa de desarrollo de ARDUINO de distribución libre y que utiliza el lenguaje Wiring, que utiliza métodos y funciones de Processing (lenguaje desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology, por Ben Fry y Casey Reas). Este lenguaje utiliza indistintamente métodos de JAVA y estructuras de C, por lo que, tanto su uso como su estructura y sintaxis son de lenguajes C y JAVA, de tal manera que se pueden crear clases o utilizar librerías indistintamente.

4.1.3.- Descripción del programa

Las tareas que tiene que ejecutar el microcontrolador se pueden dividir en dos principales:

1. Atender las comunicaciones entre PC y el sistema a través de un puerto serie.
2. Manejar la comunicación con el bloque de Monitorización y Control a través de un puerto SPI.

Para atender las comunicaciones entre el PC y el sistema se ha desarrollado un protocolo de comunicación serie que permite una comunicación bidireccional completa entre el PC y el microcontrolador. Dadas las necesidades del flujo del programa este protocolo debe ser ligero, ya que, durante su desarrollo, se comprobó que si se sobrecarga el protocolo, la pérdida de velocidad en la comunicación se incrementa notablemente.

La estructura del protocolo para el envío y recepción de un mensaje es la que aparece en la Ilustración 29.

La comunicación se inicia en el PC, que envía de forma secuencial, primero el dato y después el carácter de control que identifica al destinatario de ese dato enviado.

Al otro lado de la comunicación el microcontrolador recibe primero el dato, lo almacena en una variable tipo array y desplaza una posición hacia la izquierda el dato almacenado en dicho array. A continuación, recibe el carácter de control que identifica al destinatario del dato (ya almacenado y desplazado) y lo almacena también en el array.

En función del carácter de control recibido, el microcontrolador realiza una tarea programada y vuelve a empezar otro ciclo de comunicación con el segundo dato y el carácter de identificación de destinatario. Una vez completados todos los envíos de información desde el PC al microcontrolador, este envía al PC el valor de la corriente por el LED.

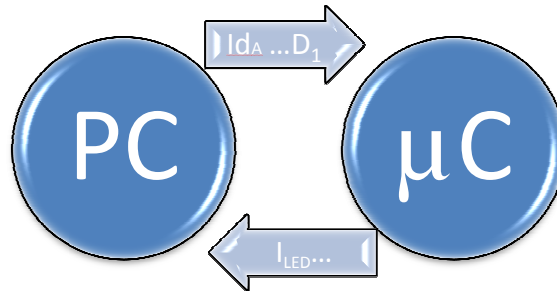


Ilustración 29.- Protocolo de Comunicación serie entre el PC y el microcontrolador

Dado que la comunicación se realiza sobre un interfaz puerto serie, la información se envía en paquetes de 8 bits, ya sean datos o caracteres de control, por lo que para enviar un mensaje completo (dato + destinatario) se necesitan 16 bits como mínimo. Si se requiere el envío de datos de más de 8 bits, simplemente se envía secuencialmente los bytes necesarios antes de enviar el carácter de control, ya que todos estos datos son almacenados en una variable tipo array, a la que se puede acceder para reconstruir la información en la memoria del microcontrolador.

La otra tarea encargada al microcontrolador son las comunicaciones con el bloque Acondicionamiento y Control. Este bloque, como ya se ha comentado anteriormente, ha sido implementado por un integrado que posee una interfaz SPI para su control y comunicaciones, por lo que fue necesario desarrollar unas funciones específicas para la implementación de la comunicación vía SPI con el integrado AMC 7820.

El Bus SPI (*Serial Peripheral Interface*) es un estándar de comunicación síncrona, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. El bus de interfaz de periféricos serie o bus SPI es un estándar para controlar casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits serie regulado por un reloj.

El protocolo de comunicación se implementa a través de las señales: SCLK, MISO, MOSI y SS. La función de cada señal es:

SCLK- Es el reloj de la comunicación. Esta señal la genera el dispositivo Máster y es común para todos los dispositivos que comparten el canal de comunicación.

MISO- Es la señal de entrada de información desde el punto de vista del Máster, y de salida desde el punto de vista del dispositivo esclavo. Esta señal también es común para todos los dispositivos que comparten el canal de comunicación.

MOSI- Es la señal de salida de información desde el punto de vista del Máster, y de entrada desde el punto de vista del dispositivo esclavo. Esta señal también es común para todos los dispositivos que comparten el canal de comunicación.

SS- Esta es la señal que selecciona el dispositivo esclavo al con el que el Máster se desea comunicar. Es una señal privativa entre el Máster y cada dispositivo esclavo dentro de la comunicación, por lo que hay tantas señales SS como tantos dispositivos esclavos tengan comunicación con el Máster.

Un esquema de la comunicación a través de este bus con un único esclavo, se puede ver en la Ilustración 30.

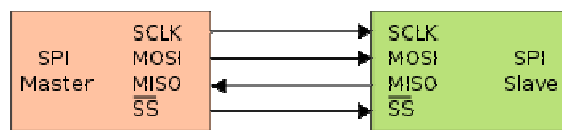


Ilustración 30.- El Bus SPI. Maestro - Esclavo

4.1.4.-Diagrama de flujo del programa del microcontrolador

El diagrama de flujo mostrado en la Ilustración 31 corresponde al software implementado en el microprocesador del ARDUINO y que permite el control del driver, así como de las comunicaciones entre el PC y el sistema.

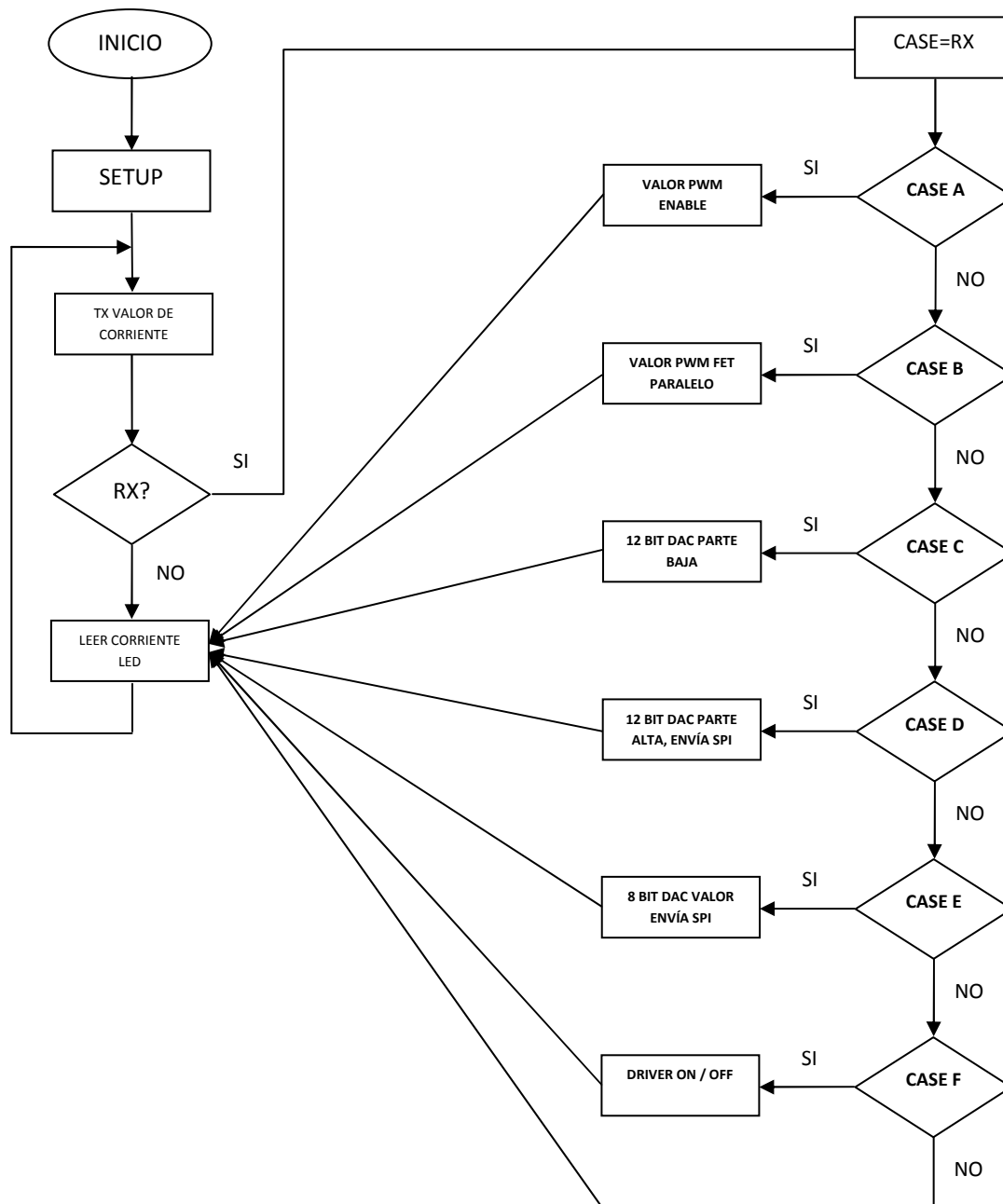


Ilustración 31.- Diagrama de flujo del software ejecutado en el microcontrolador



A continuación, se explica la función de cada bloque del anterior diagrama de flujo.

SETUP

En este bloque se realizan las operaciones necesarias de configuración de los recursos propios del microprocesador, se inicializan los puertos de comunicación (serie y SPI), se configuran los timers (PWM), se definen pines de Entradas / Salidas y se inicializan las variables internas utilizadas en el programa. En definitiva, se prepara el microprocesador para su operación en el modo específico para los requisitos propios del sistema.

TX

Tras el bloque de SETUP, que solo se ejecuta una vez, el microprocesador realiza las operaciones necesarias para enviar por puerto serie hacia el PC un mensaje que contiene información acerca del valor de la corriente medida por el conversor ADC (inicialmente el valor es cero dado que el sistema se encuentra apagado al arranque del programa).

RX

Si el puerto serie está listo y se ha recibido algún mensaje lo almacena en una variable y lo evalúa en un case switch. Si no es así pasa directamente al bloque “leer corriente por el LED”. En el caso de tener un mensaje completo, el formado por datos y destinatario, este se compara en una estructura de control condicional (case switch) y, en función del destinatario, el microprocesador realiza una u otra tarea.

Las tareas a realizar son:

Caso A

Consigna de dimming serie mediante pin específico del LM3406 (Dimming mode Enable en la consola)

Si el destinatario está designado por el identificador A, el microprocesador ejecuta con el valor del dato recibido través de una función que genera una señal PWM de ciclo de trabajo proporcional al valor del dato recibido. El microcontrolador aplica esa señal digital en el pin número 6. Para este caso, esa señal se aplica al pin de DIM previsto en el integrado LM3406, que permite controlar la corriente a la salida del driver entre un 0% y un 100% del valor programado a través del pin CS (ver punto 3.3.1.1.3.).

Caso B

Consigna de dimming paralelo mediante MOSFET en paralelo con el LED.

Si el destinatario del mensaje es identificado como caso B, al igual que en el caso A, el microprocesador asigna el valor del dato recibido al control del pin 7 del microcontrolador, que genera una señal PWM de ciclo de trabajo proporcional al valor del dato. La diferencia es que, en este caso, la señal se aplica a la puerta del MOSFET colocado en paralelo con el LED, que actúa como interruptor para implementar un dimming paralelo. Al derivar una fracción



variable de la corriente de salida del driver a través del MOSFET en paralelo con el LED, esta señal permite controlar la corriente por el LED entre un 0% y un 100% del valor programado a través del pin CS (ver punto 3.3.1.1.3.), a pesar de que la corriente entregada por el driver permanece constante.

Caso C

Consigna para programación de corriente de salida del LM3406 (byte bajo).

Cuando el destinatario del mensaje es del tipo C, el microcontrolador entiende que está recibiendo la parte baja de la consigna de corriente de salida del driver, que se programa a través del pin CS (ver punto 3.3.1.1.3.), y, que como se comentó anteriormente, tiene 12 bits de resolución. Dado el protocolo de comunicación por puerto serie, como también se comentó con anterioridad, cada mensaje a través del canal de comunicación tiene sólo 8 bits, por lo que hemos de partir y recomponer posteriormente los datos de mayor longitud. Esta información de la parte baja de la consigna se almacena en una variable para su posterior uso.

Caso D

Consigna para programación de corriente de salida del LM3406 (byte alto).

Si el destinatario del mensaje es del tipo D, es cuando el microprocesador entiende que está recibiendo la parte alta de la consigna de corriente de salida del driver, y las acciones que realiza son la de recomponer el mensaje completo y enviar la consigna de tensión al conversor DAC que reside en el integrado AMC 7820, a través del puerto SPI. La tensión analógica correspondiente al valor de corriente seleccionado, se presenta en VDAC para fijar la corriente de salida necesaria (ver Ilustración 9 en el punto 3.3.1.1.3.)

Caso E

Consigna para programación de corriente de salida del LM3406 en baja resolución.

Cuando el destinatario del mensaje recibido es del tipo E, el microprocesador asume, al igual que el caso anterior, que debe interpretarlo como la consigna de corriente de salida del driver, pero con una resolución menor, utilizando únicamente 8 bits de los 12 disponibles. Esta consigna de baja resolución proviene de un mando deslizante (slider) de la consola de control del sistema en el PC, implementado para un ajuste rápido de la corriente. En esta ocasión el microprocesador recibe el valor de un byte (8 bits) que escala convenientemente para pasar un valor proporcional de 12 bits al conversor DAC que reside en el integrado AMC 7820, a través del puerto SPI.

Caso F

Este caso es el que controla el encendido o apagado del driver, y cuando se recibe este destinatario, en función del dato recibido el microprocesador habilita o no la salida de corriente del driver. Esta funcionalidad está implementada al colocar a nivel alto o bajo el pin 6



del microprocesador, siendo el 1 lógico el que se corresponde con ON y el nivel bajo o 0V el correspondiente a OFF.

Leer corriente LED

Si el destinatario del mensaje no coincide con ningún caso de los anteriores y siempre después de haber ejecutado alguna de las tareas programadas, el flujo del programa lleva al microprocesador a leer a través del puerto SPI el valor de la corriente que circula por el LED. Para que el microprocesador pueda comunicarse a través del puerto SPI fue necesario desarrollar una función específica que manejase el puerto de comunicación.

El microprocesador tiene reservados unos pines determinados para implementar el puerto SPI. Este puerto podría implementarse a través de cualquier pin o conjunto de pines del micro, pero los pines 50, 51, 52 y 53 tienen asociados registros internos del microprocesador que los convierten en pines dedicados, a través de los cuales se puede manejar las comunicaciones por este puerto. Estos son respectivamente:

- Pin 50, SS: Slave Select.
- Pin 51, MOSI: Master Output Slave Input.
- 52, MISO: Master Input Slave Output.
- 53, SCK: Serial Clock

Los registros de control del puerto, su uso y configuración aparecen detallados en la hoja de características del fabricante del microprocesador. A modo de resumen señalar que el registro de configuración es el denominado SPCR, el registro de estado del puerto es SPSR y el que almacena los datos el SPDR. La librería desarrollada para poder comunicar ambos dispositivos consiste en esencia en manejar adecuadamente estos registros conforme a lo especificado en la hoja de características técnicas del integrado que implementa el bloque de acondicionamiento y control. La siguiente ilustración muestra el diagrama de tiempos para una operación de lectura y otra de escritura a través del puerto SPI entre el microprocesador y el AMC 7820.

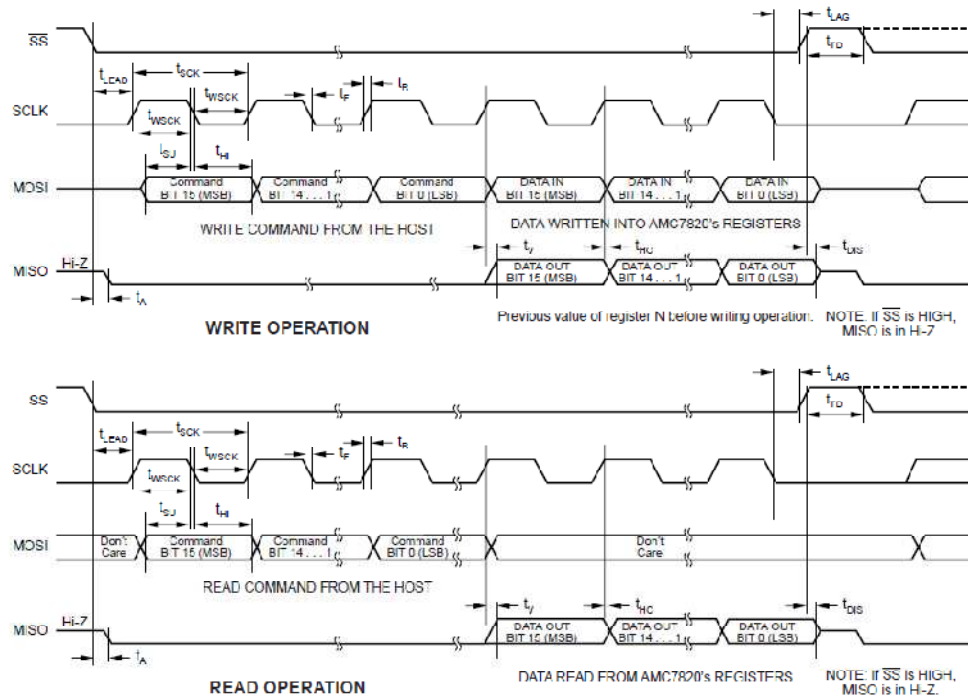


Ilustración 32.- Diagrama de tiempos para la comunicación SPI del integrado AMC7820

4.2.-Diseño del programa de la consola interfaz de usuario

4.2.1.- Introducción

El diseño del software del sistema que se ejecuta en el PC, se elaboró en lenguaje processing por tener las características mencionadas anteriormente, como la licencia de uso libre y la gran cantidad de soporte existente en Internet, soportado por los propios usuarios en foros y por la facilidad de desarrollo de aplicaciones bajo este lenguaje.

4.2.2.- Alcance del programa

El programa del bloque del PC debe encargarse de dos actividades principales que son la de mostrar los datos enviados desde el ARDUINO y la de servir de interfaz hombre-máquina para capturar y enviar las consignas que debe acatar el driver. La orientación que se ha dado al diseño de este programa es la de disponer de una consola lo más sencilla posible desde la que poder comprobar el funcionamiento correcto de todo el resto del sistema, es decir tiene un propósito meramente demostrativo.

Para el apartado de las comunicaciones nos servimos del puerto USB del que dispone el ARDUINO, que es en realidad un puerto serie emulado por un integrado, por lo que, a todos los efectos, la comunicación es a través de un puerto serie. Para la comunicación se ha implementado lógicamente el mismo protocolo de comunicación que en el programa del ARDUINO siguiendo la estructura de mensajes del mismo.



Para el diseño del interfaz con el usuario se ha optado por utilizar dos modos de captura de consignas de corriente:

- Una primera, a través de la posición de un mando deslizante o “slider” en la pantalla que tiene una resolución de 8 bits y proporciona un ajuste de aspecto analógico.
- La segunda, que aprovecha la resolución completa del convertidor DAC de 12 bits y captura la consigna mediante una entrada numérica por el teclado del ordenador. Esta forma está protegida contra la introducción de datos erróneos y solo permite el envío de consignas de corriente de rango adecuado, entre 230 y 1.500 mA.

Las otras dos consignas que atañen al control de intensidad del LED (dimming) se implementan de dos maneras posibles, una aprovechando el pin DIM del integrado LM3406 y la segunda actuando sobre el puente formado por un MOSFET que actúa como interruptor colocado en paralelo con el LED que, al cerrarse, deriva la corriente del LED directamente a la resistencia de medida de corriente. Estos valores de consignas se modifican a través de un slider de 8 bits de resolución. Con dicha resolución se obtienen 256 niveles de intensidad (entre el 0% y el 100%), lo que resulta sobradamente suficiente para implementar el dimming dentro de los límites de percepción del ojo humano.

Otra función de la interfaz del usuario es la de mostrar los datos de corriente que atraviesa el LED, para lo que se ha implementado un filtro media – mediana a las medidas provenientes del conversor ADC. La implementación de este filtro es necesaria para estabilizar la medida que, como se esperaba, tiene el rizado propio del tipo de convertidor implementado en el sistema como driver del LED.

4.2.3.- Diagrama de flujo del programa interfaz de usuario

El diagrama de bloques de la Ilustración 33 muestra el flujo que sigue el programa que se ejecuta en el PC y que, como se ha mencionado antes, sirve de interfaz con el sistema y desde el se capturan las consignas del sistema. Sirve también de visualizador de los datos procedentes del driver.

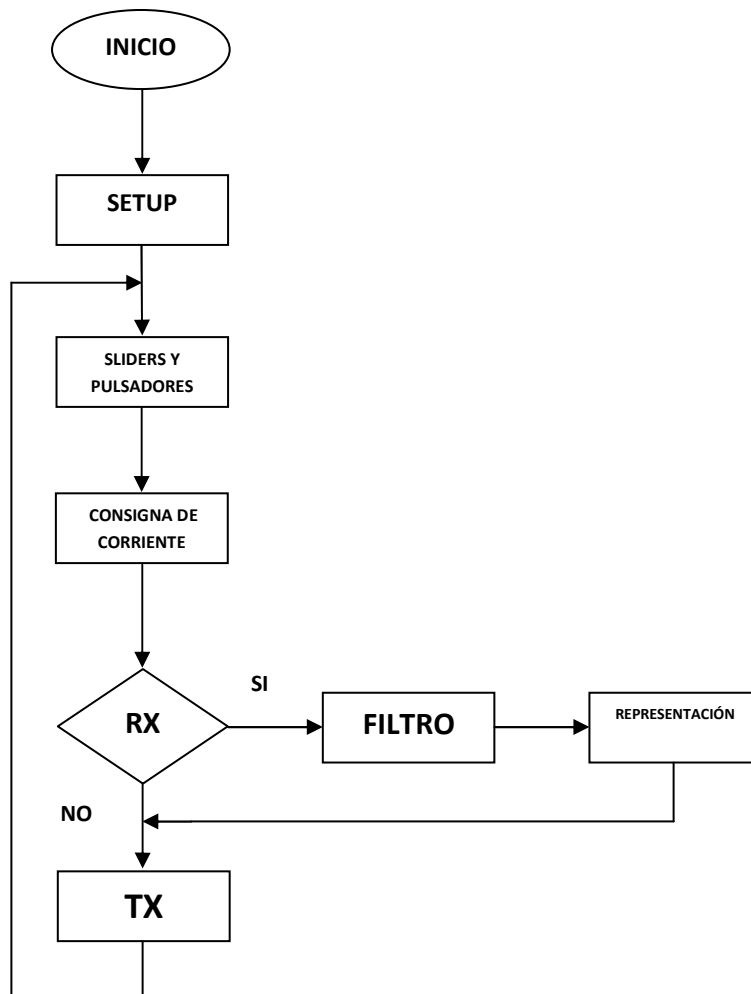


Ilustración 33.- Diagrama de flujo del programa del PC



A continuación se describe la funcionalidad de cada bloque:

Setup

Este bloque que solo se ejecuta una vez tras el inicio del programa. En él tienen lugar la declaración e inicialización de variables y comunicaciones. Se forman los elementos de la consola: pulsadores, campos de ingreso de consignas, deslizadores, y se definen las opciones de visualización de todos los elementos.

Sliders y pulsadores

En este bloque, el programa comprueba el estado y valor de los controles del programa: deslizadores, pulsadores, botón ON/OFF, activación del campo de ingreso de consignas de corriente o selección del tipo de dimming. Esta funcionalidad se ha implementado utilizando funciones propias del lenguaje de programación, ya que está orientado a gráficos y efectos visuales.

Consigna de corriente

En este bloque el programa lo que verifica es el valor de la consigna introducida por teclado para la corriente deseada por el LED con una resolución de 12 bits. Esta consigna se puede introducir únicamente con el recuadro activo, que puede distinguirse claramente al parpadear el cursor en él. Para validar la corriente deseada basta con teclear un valor adecuado y pulsar la tecla intro para que dicha consigna sea enviada al driver.

Rx

En este punto el programa chequea si ha recibido un valor de corriente que atraviesa el LED por el puerto serie. En caso negativo, pasa directamente a transmitir a la CPU local (ARDUINO) los valores actualizados de las variables de control. En caso afirmativo, antes de proceder a la transmisión mencionada, realiza las tareas de filtrado y representación del valor recibido.

Filtro

En este bloque del programa se filtran los datos recibidos del driver conforme se van recibiendo las lecturas de corriente. El filtro implementado es del tipo media – mediana que ordena de forma creciente los valores recibidos, elimina los valores extremos, y calcula la media de una muestra de 20 valores, mostrándose ésta por pantalla.

Representación

En este bloque se realiza la representación de los datos convenientemente escalados, multiplicando el valor numérico recibido y filtrado por el factor de conversión necesario, obteniendo el valor de la corriente que atraviesa el LED en amperios. Ese factor de conversión es dependiente de los valores de algunos componentes utilizados en la implementación del driver, mostrándose el detalle del cálculo en el Anexo A-1.



Tx

En este bloque el programa envía al ARDUINO los valores de consigna y de estado de todas las variables que se utilizan para controlar el sistema. Esto se hace de forma secuencial y ordenada como se ha establecido en el protocolo de comunicación explicado anteriormente.

En el capítulo Capítulo 6.- Pruebas y Resultados Experimentales en el apartado 6.3.1.- Pruebas de funcionalidad de la consola, se encuentra una guía de usuario del programa, donde se puede observar el manejo de la consola y de todas las funcionalidades de la misma.

Los listados completos del SW implementado, tanto para el ARDUINO como para la Interfaz Hombre-Máquina en el PC, se encuentran los Anexos A-2 y A-3 respectivamente.

Capítulo 6.- Pruebas y Resultados Experimentales del sistema

6.1.- Introducción a las pruebas del sistema

En este capítulo se describen las pruebas realizadas sobre el sistema implementado y que demuestran su funcionamiento conforme a las especificaciones de partida planteadas en puntos anteriores del presente documento.

Antes de comenzar, recordar que el sistema es capaz de alimentar LEDs de alto brillo con una corriente de hasta 1500 mA y en función de la tensión de alimentación del sistema, hasta un máximo de 5 LEDs en serie aproximadamente. La tensión de alimentación del sistema debe ser de 24VDC.

6.2.- Alcance de las pruebas del sistema

En cuanto al alcance de las pruebas realizadas, éstas comprueban las funcionalidades del sistema a dos niveles:

- Funcionamiento del sistema en su conjunto: rango de corrientes, resolución en el control de la corriente, resolución de la medida de corriente, error en el control y la medida de corriente, evaluación de funcionamiento de los diferentes métodos de “dimming” previstos.
- Detalle del funcionamiento del driver: comprobación del funcionamiento, con oscilogramas, para los casos previstos (1, 2 y 5 LEDS) y parámetros (f_{OSC} , T_{ON} , T_{OFF} e ΔI_L) descritos en el diseño.

6.3.- Elementos necesarios para la realización de las pruebas

A continuación se muestra una lista de elementos empleados durante las pruebas de funcionamiento:

- Una fuente de alimentación de 24 voltios
- Un osciloscopio de al menos 40 MHz de ancho de banda
- Un voltímetro o polímetro digital.
- Diferentes LEDs o arrays de LEDs
- Un PC Pentium o equivalente con sistema operativo instalado Windows, Linux o Mac y un puerto USB libre.
- Luxómetro digital marca Ceto modelo CT133B

A continuación se muestra una imagen del montaje de necesario para la realización de las pruebas.



Ilustración 34.- Montaje para efectuado durante las pruebas del sistema

6.3.1.- Pruebas de funcionalidad de la consola

Estas pruebas tienen el propósito de comprobar el funcionamiento del sistema, a nivel de interfaz con el usuario a través de la consola programada para su ejecución en el PC.

6.3.1.1.- Variación de la corriente entregada al LED

A través de la consola de control del sistema se puede modificar la corriente que se entrega al LED objeto de estudio.

Para ello se dispone del montaje que figura en la Ilustración 34, poniéndose en funcionamiento el sistema al pulsar el icono de encendido en el margen superior derecho de la consola, tal como se muestra en la Ilustración 35.

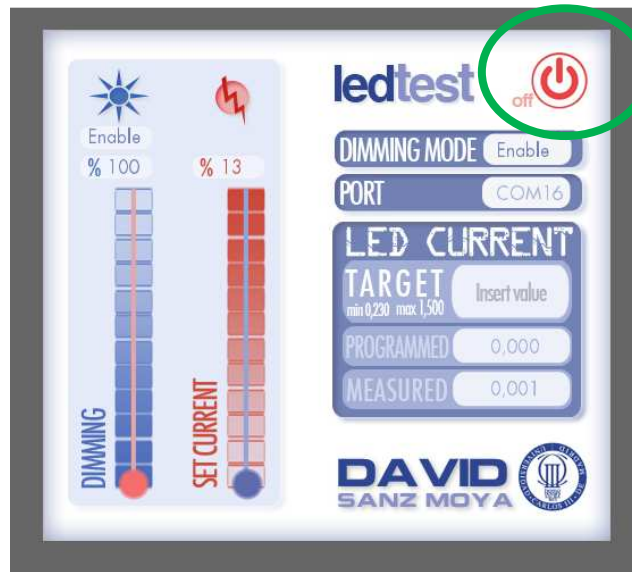


Ilustración 35.- Consola interface del sistema

Al encenderse el LED, el sistema mide la corriente que circula por el LED y que, como ya se mencionó anteriormente, es el valor mínimo de 230 mA.

6.3.1.2.- Variación del valor de corriente a través del Slider, resolución de 8 bits

Una vez encendido el sistema, la corriente por el LED puede variar hasta los 1500 mA si se actúa sobre el Slider SET CURRENT. Esta funcionalidad tiene una resolución de 8 bits, mientras que el conversor DAC del sistema tiene una resolución de 12 bits. Este control tiene la única ventaja de poder variar la corriente de un modo rápido entre el valor mínimo y el máximo de corriente disponible expresada en términos porcentuales desde un 15% a 100%, dado que la corriente mínima es de 0,230 A y la máxima de 1,5 A.

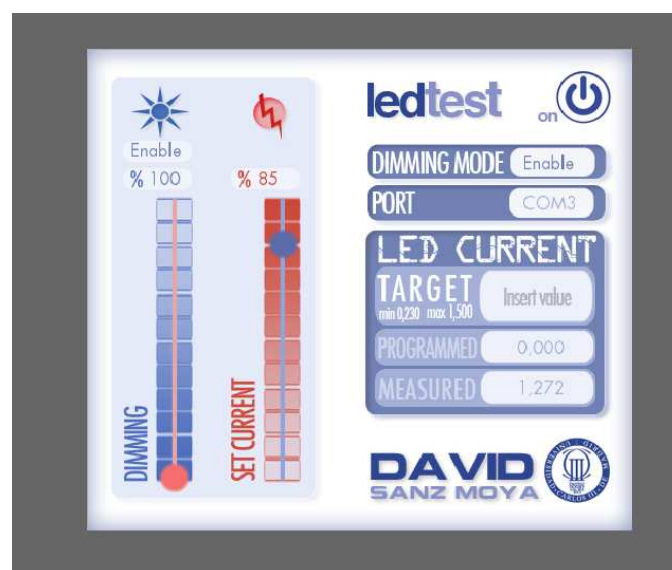


Ilustración 36.- Consigna de corriente 8 bits de resolución

6.3.1.3.- Variación del valor de corriente introduciendo el valor por teclado, resolución de 12 bits

Para poder enviar al sistema consignas con el valor de corriente deseado, se ha implementado otro modo, consistente en introducir directamente el valor de corriente deseado por teclado. Con una resolución de 12 bits, este método de programar el valor de la corriente aprovecha el 100% de los recursos del hardware que implementa el sistema. Para introducir un valor es necesario hacer click con el ratón encima del área de la consola situada a la derecha del campo TARGET y escribir en el campo INSERT VALUE un valor válido de corriente entre 230 mA y 1.500 mA, pulsando la tecla de intro para validar y enviar la consigna al driver. El valor de la última consigna enviada aparece en el campo PROGRAMMED.

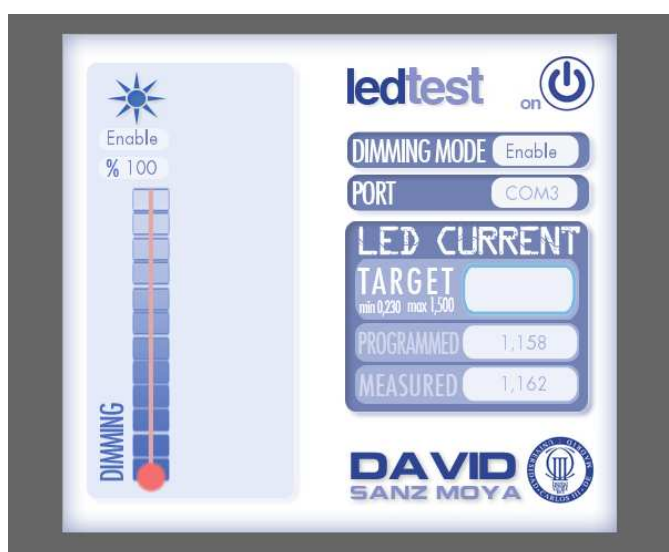


Ilustración 37.- Consigna de corriente 12 bits de resolución

Inmediatamente se puede comprobar que en el campo MEASURED de la Ilustración 37 aparece el valor de corriente medido. Conviene resaltar que la consigna de corriente se envía directamente al lazo de control analógico implementado en el driver, que básicamente emplea un control proporcional. Por ello, es esperable alguna diferencia entre el valor de corriente medido y el valor de consigna, debido a los siguientes factores:

- Error en la generación de la consigna analógica.
- Error en el control proporcional por la ganancia no infinita del amplificador de error.
- Errores en el acondicionamiento de la medida de la corriente y en su digitalización.

En todo caso, como veremos, este error es irrelevante para el tipo de ensayos que pretendemos realizar con nuestro sistema.

6.3.1.4.- Control de intensidad luminosa del LED

El control de la intensidad luminosa del LED tiene por objeto el disminuir la luz emitida por el diodo. Esta disminución se denomina en inglés dimming y en la práctica consiste en variar el ciclo de trabajo de la corriente aplicada al LED. En este sistema se puede conseguir este efecto de dimming sobre el LED de dos maneras. A través del pin DIM LM3406, y utilizando una técnica que consiste en puentear el LED con un MOSFET en paralelo. De cara a testear esta funcionalidad, se utilizó para cuantificar la cantidad de luz emitida un Luxómetro digital.

Para a poder tomar las medidas sin influencias externas de luz, se utilizó una caja de cartón donde se ha situado en su interior, tanto el LED bajo prueba como el sensor del Luxómetro. Este montaje tiene como único propósito el poder tomar valores diferenciales de iluminancia al activar la función de dimming del sistema sin recibir interferencias de la luz ambiental.

El montaje realizado se muestra en las siguientes ilustraciones.



Ilustración 38.- Montaje para pruebas de medida de iluminancia



Ilustración 39.- Medida de iluminancia

6.3.1.5.- Control de intensidad luminosa a través del pin DIM del integrado LM3406

Al introducir una señal digital TTL a través del pin número ocho del integrado LM 3406 y variando su ciclo de trabajo, se consigue este efecto de oscurecimiento del LED conectado al sistema. Esta forma de realizar el efecto dimming consiste en habilitar y deshabilitar la salida del convertidor. Al variar el ciclo de trabajo de la salida de corriente del convertidor, se consigue variar el tiempo en que se enciende el LED y por consiguiente la luz que emite y el efecto que produce a la vista es que disminuye el brillo.

Para probar esta funcionalidad abrimos la consola con el montaje anterior. La medida del luxómetro al inicio es cero. Activamos la consigna de encendido y buscamos la corriente que nos da una lectura de 1000 Luxes en el luxómetro. Para este caso y con el LED de 5W la corriente se sitúa en 0.490 A y el luxómetro registra una lectura de 1000 Lux.



Ilustración 40.- Dimming en modo enable. Salida al 100%

Si ahora deslizamos el slider dimming hasta el 50%, observamos que el luxómetro ahora da una lectura de 512 Lux y el sistema nos da una lectura de 0.245 A que es aproximadamente la mitad de la corriente programada inicialmente.



Ilustración 41.- Dimming en modo enable. Salida al 50%

Si ahora deslizamos el slider dimming hasta el 25% vemos que la lectura del Luxómetro es de 262 Lux y la corriente que excita el LED de 0.123 A



Ilustración 42.- Dimming en modo enable. Salida al 25%

Queda comprobado que el sistema es consistente y funciona adecuadamente en el control de la luz emitida por el LED y que existe una pequeña no-linealidad en la relación entre la corriente y la iluminancia, disminuyendo ligeramente la eficiencia (pendiente de la curva iluminancia-corriente) al aumentar la corriente.

6.3.1.6.- Control de intensidad luminosa en modo bridge o bypass utilizando un MOSFET.

Para realizar esta prueba pulsamos sobre el área “dimming mode” de la consola, cambiando el estado del campo de “Enable” a modo “Bypass”. De esta manera efectuamos el dimming mediante el uso de un MOSFET en paralelo con el LED y colocando la señal de PWM en su pin GATE. De este modo modulamos el canal del transistor con esa señal de PWM consiguiendo un efecto de disminución del brillo de LED. En realidad lo que ocurre es que se desvía la corriente que proporciona el driver a través del transistor durante el tiempo en que la señal PWM está a nivel alto, mientras que durante el tiempo que está a nivel bajo, la corriente atraviesa el LED emitiendo luz.

Comprobamos su funcionamiento:

Deslizamos nuevamente el slider dimming hasta el 50%, observamos que el Luxómetro ahora da una lectura de 409 Lux y el driver el sistema nos da una lectura de 0.485 A que es prácticamente el total de la corriente programada.



Ilustración 43.- Dimming en Modo bridge o bypass. Salida al 50%

Si ahora deslizamos el slider dimming hasta el 25% vemos que la lectura del Luxómetro es de 163 Lux y la corriente que suministra el convertidor a la carga es 0.495 A.



Ilustración 44.- Dimming en Modo bridge o bypass. Salida al 25%

Las conclusiones que podemos sacar a priori de este hecho es que el comportamiento de esta funcionalidad es coherente con lo previsto en el diseño del sistema, ya que este modo de dimming no afecta a la corriente que debe suministrar el convertidor, ya que la carga que ve es la misma en todo momento. Las pequeñas diferencias que se observan en la corriente pueden

ser debidas a que el convertidor si aprecia diferencias en el comportamiento dinámico de el LED frente a al transistor MOSFET.

6.4.-Pruebas propias del convertidor Buck

En este apartado, se comprueba el buen funcionamiento del convertidor tipo Buck realizando una serie de pruebas con el fin de chequear sus virtudes como convertidor de corriente continúa.

Para ello ha sido necesario realizar el montaje sobre la placa de driver de la ilustración siguiente:

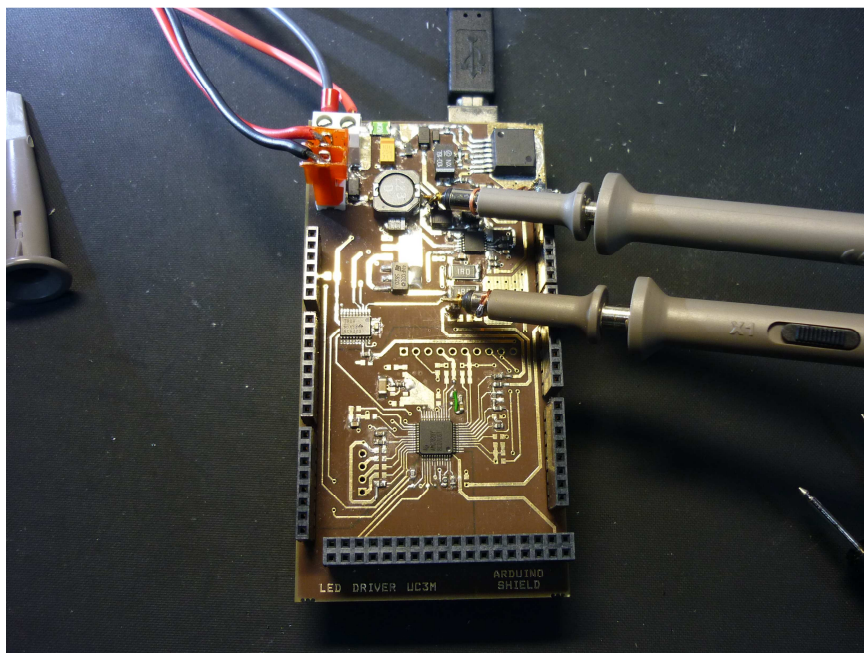


Ilustración 45.- Montaje para pruebas propias del convertidor

El motivo de de tener que minimizar la conexión a masa de las sondas del osciloscopio, es debido a que se producen interferencias en la medida a través de estas. Por lo que minimizando la longitud de los cables se han minimizado también esas interferencias.



Para la realización de las pruebas ha sido necesario disponer de los siguientes equipos de laboratorio:

- Polímetro de precisión(40000 cuentas).
Marca: Fluke
Modelo: 289
- Fuente de alimentación de laboratorio con salida de tensión ajustable y rango de alimentación desde 0 V a 30V.
Marca: TTI
Modelo: QL355T
- Osciloscopio de laboratorio.
Marca: Tektronix
Modelo: 2024

Además de este equipamiento, también se han empleado los LEDS de prueba siguientes:

LED de ensayo Nº1

Color Blanco

Potencia = 1W

$V_F = 3.2 \text{ V}$

$I_{NOM} = 0.350 \text{ A}$

LED de ensayo Nº2

Color Blanco

Potencia = 5W

$V_F = 6.8 \text{ V}$

$I_{NOM} = 0.700 \text{ A}$

LED de ensayo Nº3

Color Blanco

Potencia = 10 W

$V_F = 8.90 \text{ V}$

$I_{NOM} = 1 \text{ A}$



LED ensayo Nº4

Color Rojo

Potencia = 2 W

$V_F=2.97$ V

$I_{NOM}=0.700$ A

Color Azul

Potencia = 3 W

$V_F=4.20$ V

$I_{NOM}=0.700$ A

Las pruebas realizadas al convertidor se clasifican en dos tipos de ensayo:

- 1- Manteniendo constante la carga a la salida variando la tensión de entrada al convertidor.
- 2- Manteniendo constante la tensión de entrada variando la tensión a la salida del convertidor.

El propósito principal de estas pruebas es el de verificar el comportamiento del driver en diferentes puntos de funcionamiento. Estas pruebas servirán para comprobar, cómo, variaciones en la tensión de entrada no afectan a la salida para el primer tipo de ensayo. Y, cómo, variaciones en la demanda de tensión de salida de la carga, no afectan a la corriente entregada por el convertidor en el segundo tipo de ensayo.

Datos obtenidos

Los datos obtenidos tras las medidas realizadas y que son de nuestro interés son:

- Tensión de entrada al convertidor, V_{IN} , su valor se ha obtenido de la lectura directa en el voltímetro que incorpora la fuente de alimentación utilizada.
- Corriente de entrada, I_{IN} su valor se ha obtenido de la lectura directa en el amperímetro que incorpora la fuente de alimentación utilizada. Este valor incluye, por tanto, la corriente de alimentación de todos los bloques del circuito, no sólo la de entrada al driver.
- Tensión de salida del convertidor, V_O , su valor se ha obtenido midiendo tensión con el polímetro en los terminales de salida del convertidor.
- Corriente de salida, I_O , su valor se ha obtenido a través del propio sistema leyendo su valor en la consola del PC. Se ha comprobado con el polímetro que el sistema mide correctamente la corriente que entrega el convertidor a su salida.



- Frecuencia de oscilación, f_{osc} , su valor se ha obtenido directamente de la medida del canal 1 del osciloscopio, con la sonda conectada entre los puntos TP1 (ver esquema del driver) y tierra.
- Ciclo de trabajo del convertidor, D , su valor se ha obtenido directamente de la medida del canal 1 del osciloscopio, con la sonda conectada entre los puntos TP1 (ver esquema del driver) y tierra.
- Valor del rizado de la corriente de salida del convertidor, Δi_L , su valor se ha obtenido de la medida de la amplitud pico a pico de la tensión en el canal 2 del osciloscopio, con la sonda conectada entre los puntos TP2 (ver esquema del driver) y tierra. A partir de esta amplitud de tensión, el rizado de la corriente se obtiene sin más que dividir por el valor de, R_{SNS} , que tiene un valor de 0.5Ω .
- T_{ON} , ya fue definido anteriormente como el periodo de tiempo en que el interruptor S está cerrado. Se calcula a partir del cociente entre el ciclo de trabajo positivo y la frecuencia de oscilación de la señal.

$$T_{ON} = \frac{D}{f_{osc}} \cdot 100$$

Ecuación 16.- Cálculo experimental de T_{ON}

- T_{OFF} , ya fue definido anteriormente como el periodo de tiempo en que el interruptor S está cerrado. Se calcula a partir del cociente entre el ciclo de trabajo positivo y la frecuencia de oscilación de la señal.

$$T_{OFF} = \frac{(1 - D)}{f_{osc}} \cdot 100$$

Ecuación 17.- Cálculo experimental de T_{OFF}

- Potencia de entrada al convertidor, P_{IN} , se calcula como el producto de la tensión de entrada y el valor de la corriente de entrada al convertidor.

$$P_{IN} = V_{IN} \cdot I_{IN}$$

Ecuación 18.- Cálculo de la potencia de entrada al convertidor

- Potencia de salida cedida por el al convertidor, P_O , se calcula como el producto de la tensión de salida y el valor de la corriente de salida del convertidor.

$$P_O = V_O \cdot I_O$$

Ecuación 19.- Cálculo de la potencia de salida del convertidor



- Rendimiento energético del convertidor, η , se calcula en términos porcentuales como el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada al convertidor.

$$\eta = \frac{P_o}{P_{IN}} \cdot 100$$

Ecuación 20.- Cálculo del rendimiento energético del convertidor

Hay que tener en cuenta que esta medida de rendimiento no es la del driver aislado, sino la del rendimiento global del sistema, incluyendo los consumos de todos los bloques del circuito.

- Un parámetro importante que relaciona los cambios a la salida del regulador en función de los cambios a la entrada es el **F.R.L.** (factor de regulación de línea). Este factor indica la variación en tanto por ciento de la corriente a la salida en función de la variación de la tensión de entrada.

La ecuación para su cálculo es:

$$F.R.L. = \frac{\frac{\Delta I_o}{I_{NOM}} \cdot 100}{\Delta V_{IN}}$$

Ecuación 21.- Factor de regulación de línea

- Otro parámetro importante que relaciona los cambios a la salida del regulador en función la carga, es el **F.R.C.** (factor de regulación de carga). Este factor indica la variación en tanto por ciento de la corriente a la salida en función de la variación de la tensión en la carga (V_o).

La ecuación para su cálculo es:

$$F.R.C. = \frac{\frac{\Delta I_o}{I_{NOM}} \cdot 100}{\Delta V_o}$$

Ecuación 22.- Factor de regulación de carga

6.4.1.- Prueba del convertidor con carga constante y tensión de entrada variable

6.4.1.1.- Prueba del convertidor con carga constante y tensión de entrada variable. LED de prueba N°1

Corriente programada en el sistema, $I_{LED}=0.350\text{ A}$

Medidas:

V_IN (V)	I_IN (A)	V_o (V)	I_o (A)	f_OSC (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
18	0,135	3,1516	0,35	492,2	21,82	0,22

Tabla 5.- Medidas para VIN = 18 V y ILED = 0.350 A

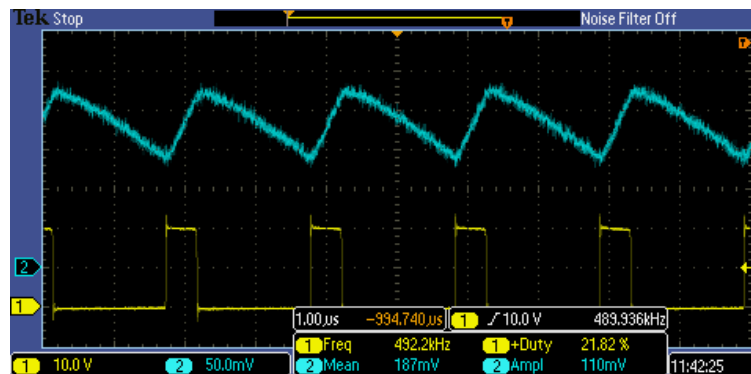


Ilustración 46.- Formas de onda para VIN = 18 V y ILED = 0.350 A

V_IN (V)	I_IN (A)	V_o (V)	I_o (A)	f_OSC (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
24	0,103	3,1503	0,35	458,4	16,29	0,248

Tabla 6.- Medidas para VIN = 24 V y ILED = 0.350 A

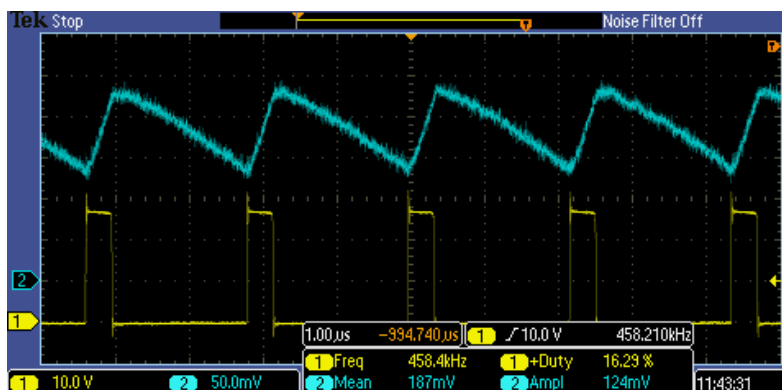


Ilustración 47.- Formas de onda para VIN = 24 V y ILED = 0.350 A

V _{IN} (V)	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
30	0,086	3,1474	0,35	435,6	13,04	0,28

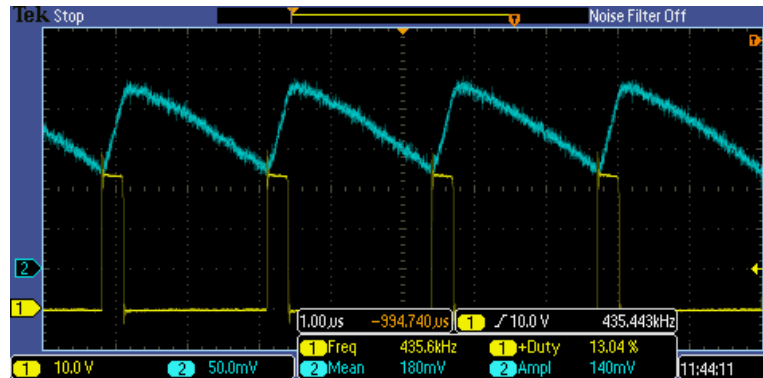
Tabla 7.- Medidas para V_{IN} = 30 V y I_{LED} = 0.350 A


Ilustración 48.- Formas de onda para VIN = 30 V y ILED = 0.350 A

6.4.1.2.- Prueba del convertidor a carga constante y tensión de entrada variable. LED de prueba N°2

Corriente programada en el sistema, I_{LED}=0.7 A

Medidas:

V _{IN} (V)	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
18	0,404	6,358	0,701	529,7	41,3	0,288

Tabla 8.- Medidas para, VIN = 18 V y ILED = 0.700 A

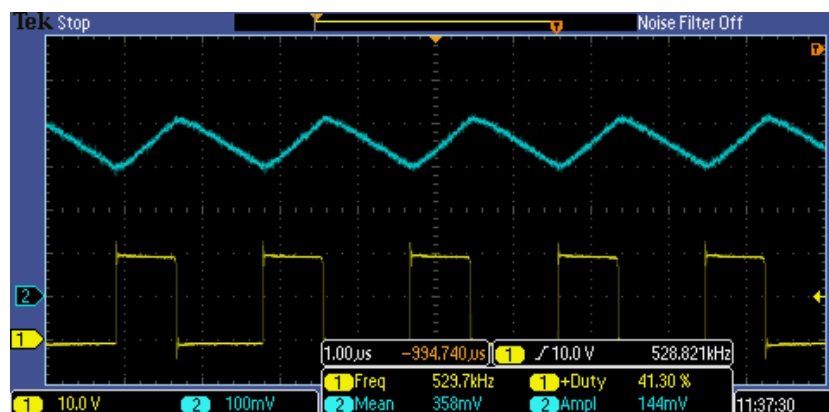


Ilustración 49.- Formas de onda para, VIN = 18 V y ILED = 0.700 A

V _{IN} (V)	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
24	0,269	6,359	0,702	523,7	30,93	0,32

Tabla 9.- Medidas para, VIN = 24 V y ILED = 0.700 A

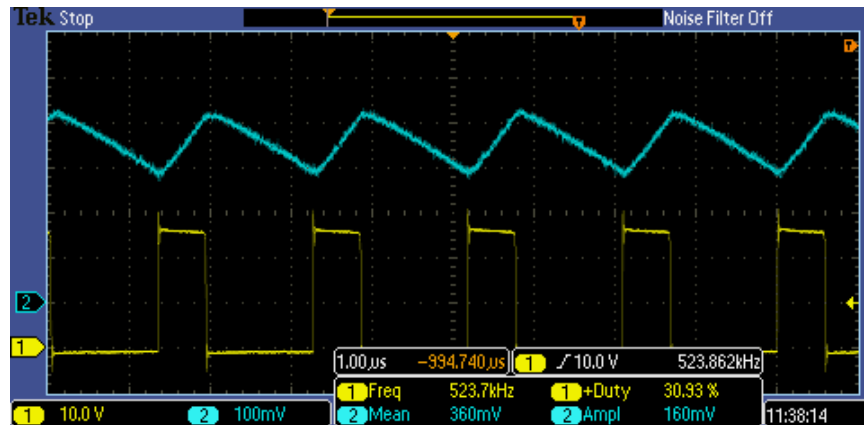


Ilustración 50.- Formas de onda para, VIN = 24 V y ILED = 0.700 A

V _{IN} (V)	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
30	0,219	6,36	0,703	504,9	24,74	0,36

Tabla 10.- Medidas para, VIN = 30 V y ILED = 0.700 A

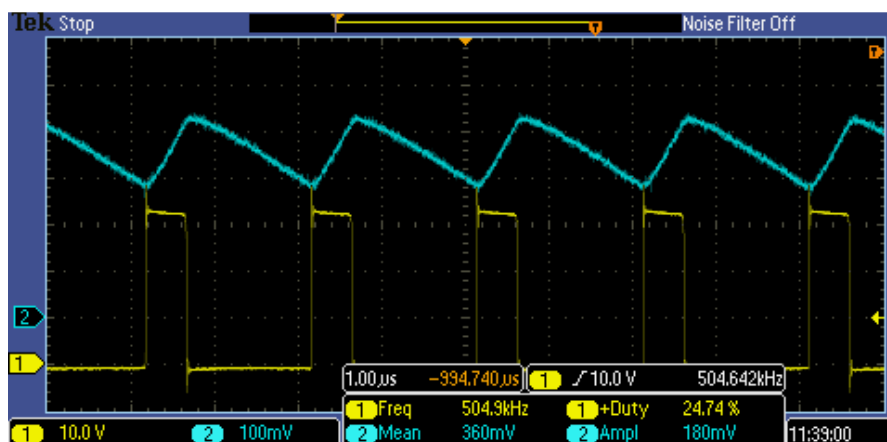


Ilustración 51.- Formas de onda para, VIN = 30 V y ILED = 0.700 A

6.4.1.3.- Prueba del convertidor con carga constante y tensión de entrada variable. LED de prueba N°3

Corriente programada en el sistema, $I_{LED}=1$ A

Medidas:

V_IN (V)	I_IN (A)	V_o (V)	I_o (A)	f_OSC (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
18	0,633	8,846	1,003	545,1	56,69	0,272

Tabla 11.- Medidas para, VIN = 18 V y ILED = 1 A

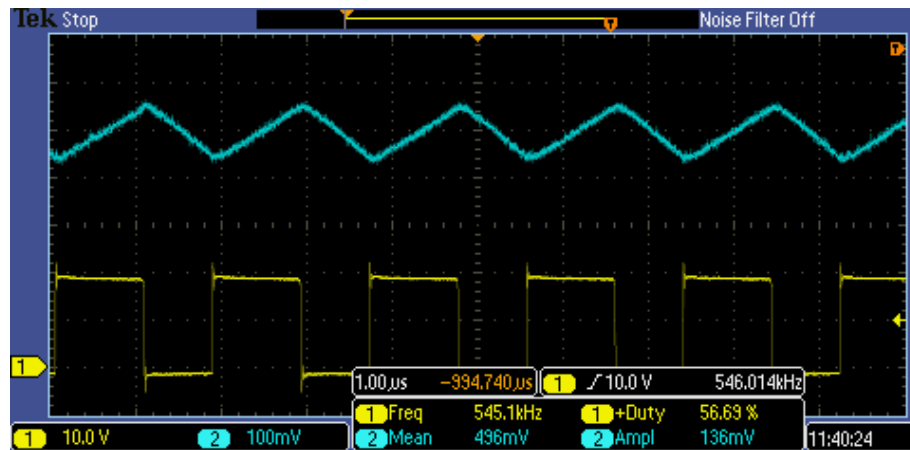


Ilustración 52.- Formas de onda para, VIN = 18 V y ILED = 1 A

V_IN (V)	I_IN (A)	V_o (V)	I_o (A)	f_OSC (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
24	0,483	8,857	1,007	538,9	42,48	0,344

Tabla 12.- Medidas para, VIN = 24 V y ILED = 1 A

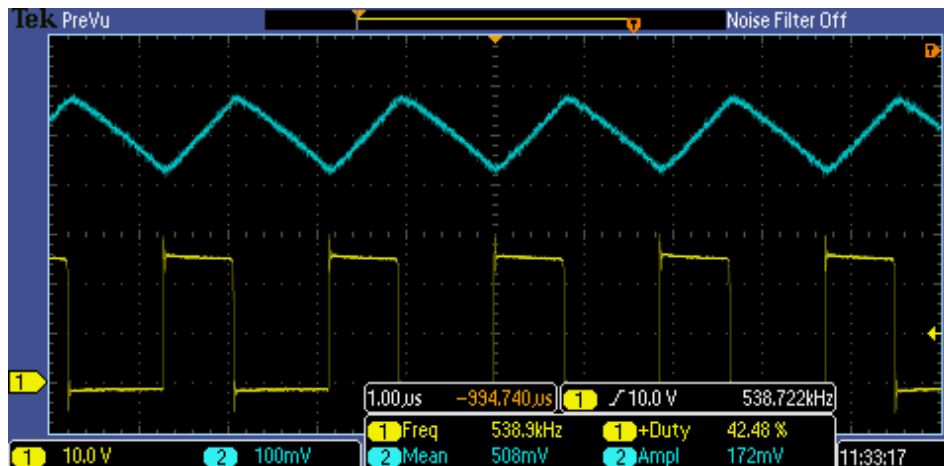
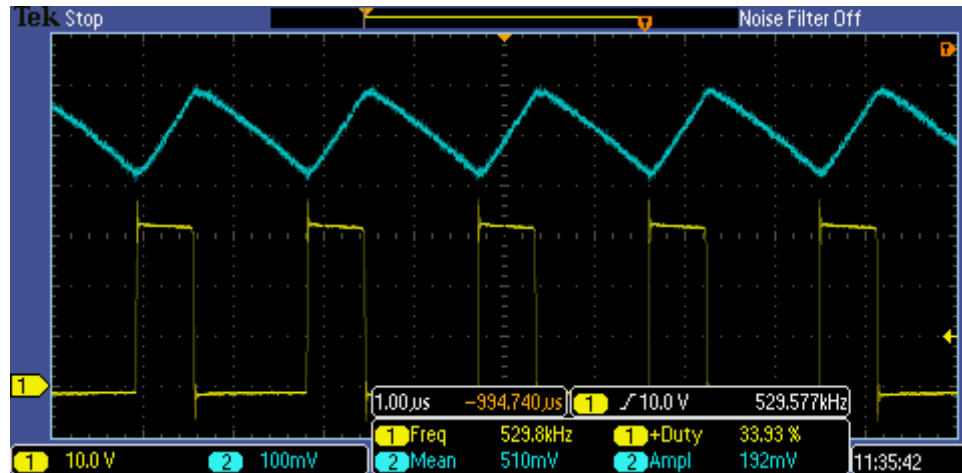


Ilustración 53.- Formas de onda para, VIN = 24 V y ILED = 1 A

V_IN (V)	I_IN (A)	V_o (V)	I_o (A)	f_osc (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
30	0,394	8,854	1,016	529,8	33,93	0,384

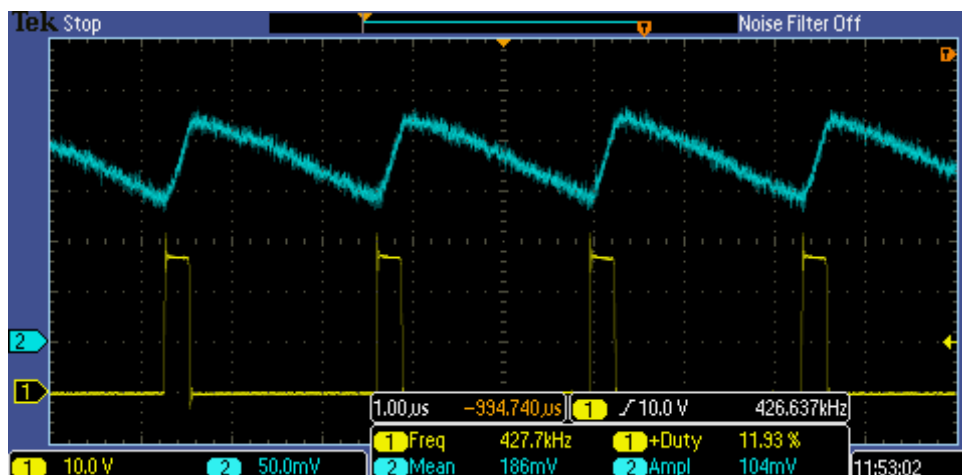
Tabla 13.- Medidas para, $V_{IN} = 30$ V y $I_{LED} = 1$ A

Ilustración 54.- Formas de onda para, $V_{IN} = 30$ V y $I_{LED} = 1$ A

6.4.2.1.- Prueba del convertidor a tensión nominal y carga variable. LED de ensayo N°4 Color rojo

Corriente programada en el sistema, $I_{LED}=0.350$ A

Medidas:

Nº LEDS	I_IN (A)	V_o (V)	I_o (A)	f_osc (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
1	0,087	2,0937	0,35	427,7	11,93	0,208

Tabla 14.- Medidas para, N° de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.350$ A

Ilustración 55.- Formas de onda para, N° de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.350$ A

Nº LEDS	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
2	0,119	4,1375	0,35	487	20,37	0,268

Tabla 15.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, I_{LED} = 0.350 A

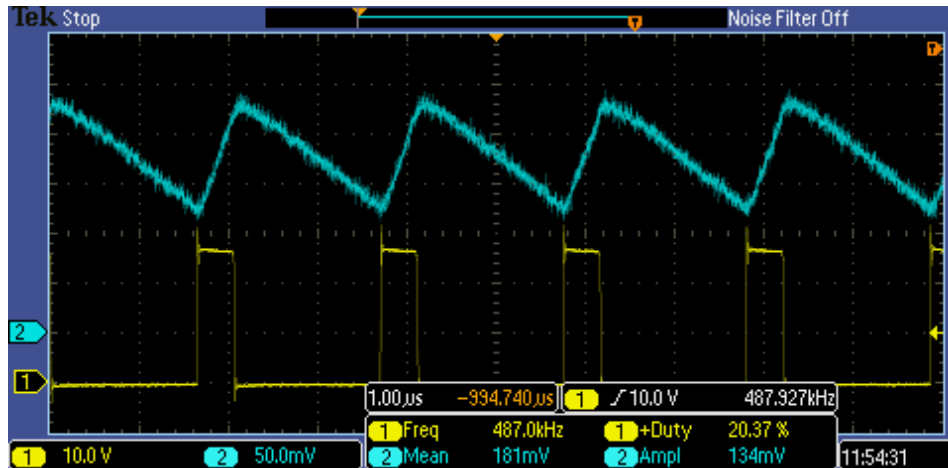


Ilustración 56.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, I_{LED} = 0.350 A

Nº LEDS	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
5	0,212	10,213	0,35	533,1	45,66	0,344

Tabla 16.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, I_{LED} = 0.350 A

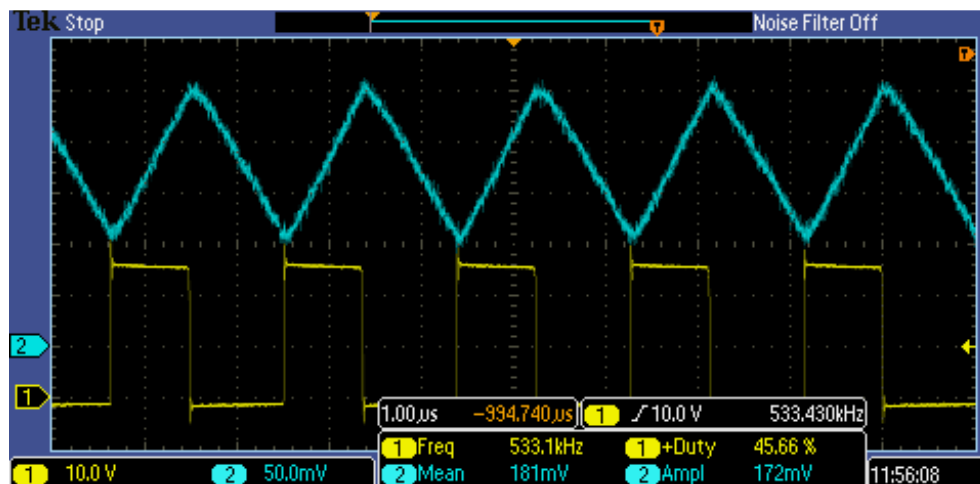


Ilustración 57.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, I_{LED} = 0.350 A

6.4.2.2.- Prueba del convertidor a tensión nominal y carga variable. LED de ensayo N°4 Color rojo

Corriente programada en el sistema, $I_{LED}=0.700\text{ A}$

Medidas:

Nº LEDS	I_IN (A)	V_o (V)	I_o(A)	f_osc (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
1	0,147	2,3031	0,7	458,5	13,98	0,248

Tabla 17.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)

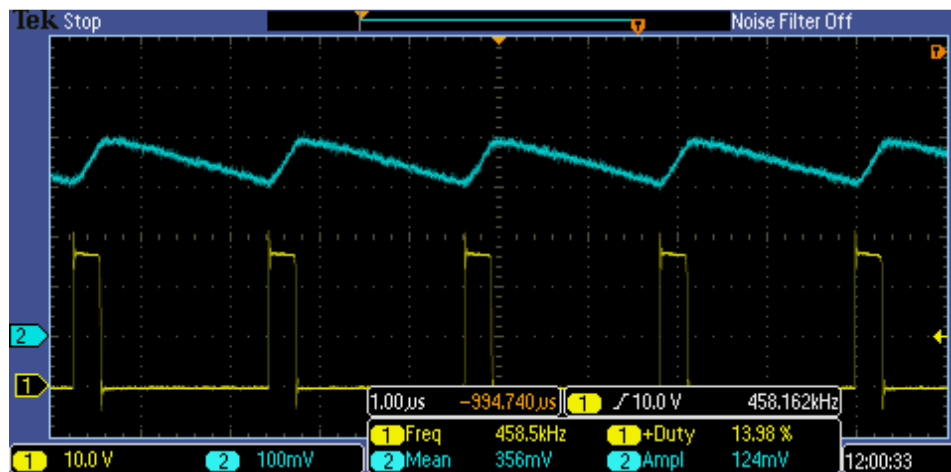


Ilustración 58.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)

Nº LEDS	I_IN (A)	V_o (V)	I_o(A)	f_osc (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A_p-p)
2	0,215	4,5122	0,701	509,8	23,3	0,28

Tabla 18.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)

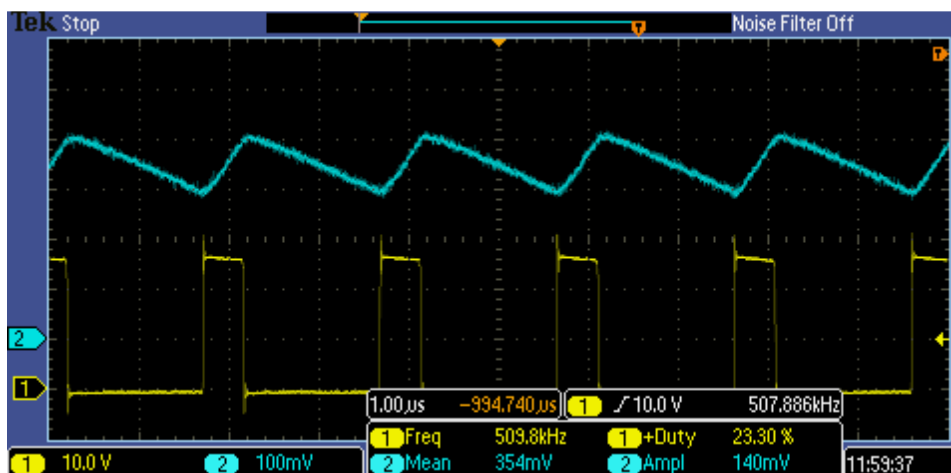


Ilustración 59.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Rojo)

Nº LEDS	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ _{IL} (A _{p-p})
5	0,407	11	0,701	544	50,28	0,344

Tabla 19.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, I_{LED} = 0.700 A(LED Rojo)

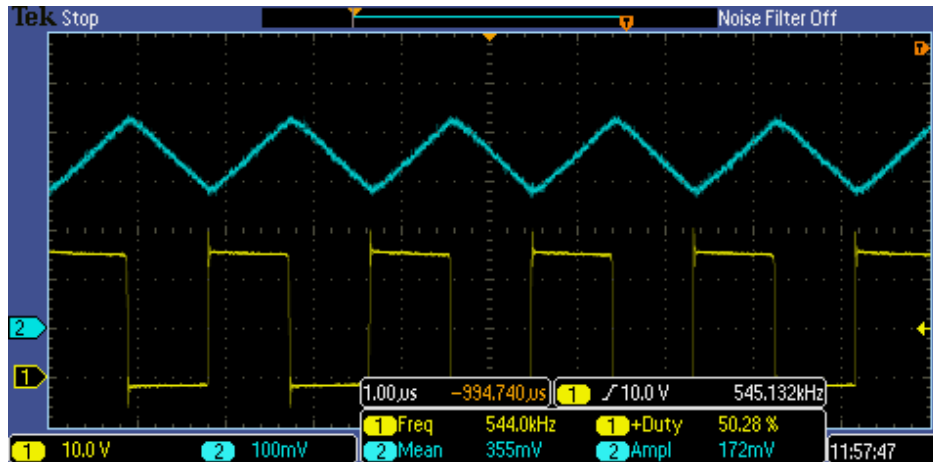


Ilustración 60.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, I_{LED} = 0.700 A (LED Rojo)

6.4.2.3.- Prueba del convertidor a tensión nominal y carga variable. LED de ensayo Nº4 Color azul

Corriente programada en el sistema, I_{LED}=0.350 A

Medidas:

Nº LEDS	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ _{IL} (A _{p-p})
1	0,109	3,4611	0,35	467,7	15,57	0,252

Tabla 20.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, I_{LED} = 0.350 A (LED Azul)

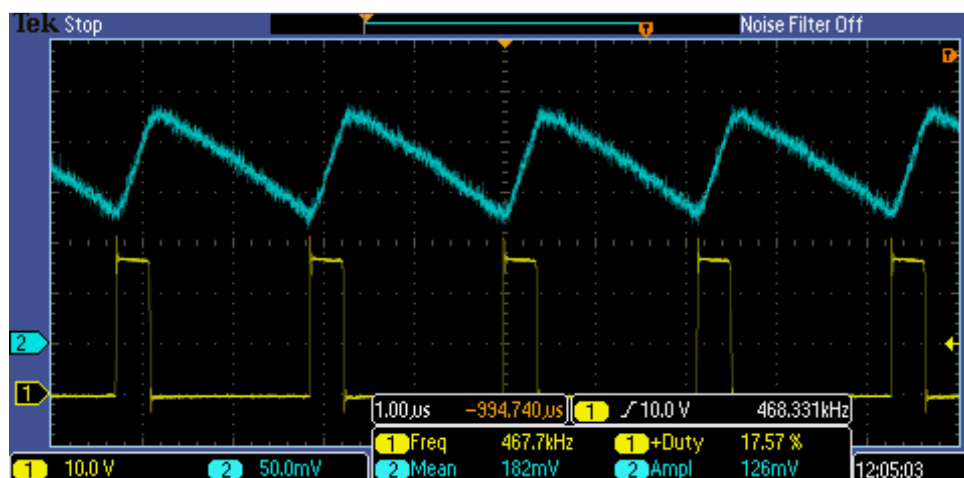


Ilustración 61.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, I_{LED} = 0.350 A (LED Azul)

Nº LEDS	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
2	0,119	4,1375	0,35	487	20,37	0,268

Tabla 21.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, I_{LED} = 0.350 A (LED Azul)

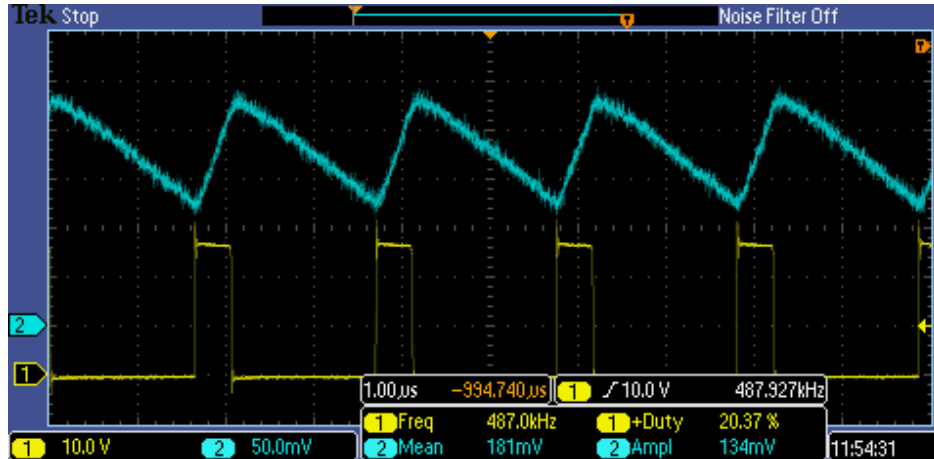


Ilustración 62.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, I_{LED} = 0.350 A (LED Azul)

Nº LEDS	I _{IN} (A)	V _o (V)	I _o (A)	f _{OSC} (KHz)	D(%)	Δ_{IL} (A _{p-p})
5	0,314	17,247	0,359	558,9	74,92	0,268

Tabla 22.- Medidas para, Nº de LEDS = 5, I_{LED} = 0.350 A (LED Azul)

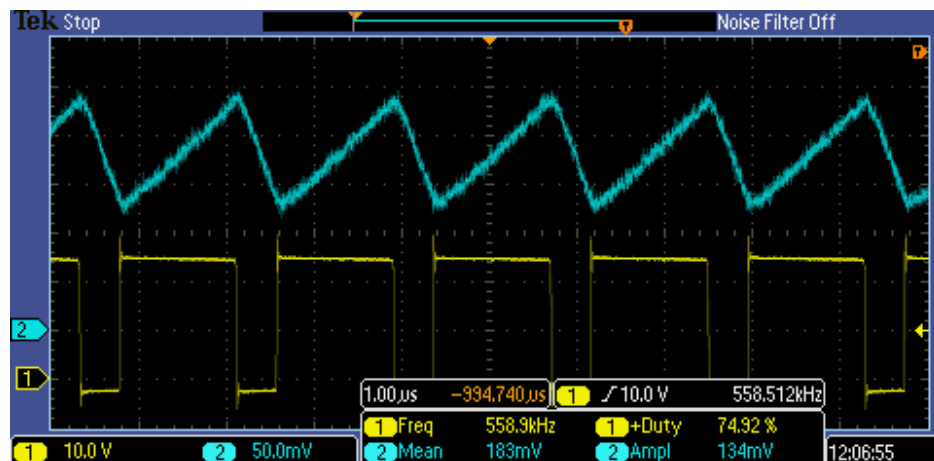


Ilustración 63.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 5, I_{LED} = 0.350 A (LED Azul)

Corriente programada en el sistema, $I_{LED}=0.700\text{ A}$

Medidas:

Nº LEDS	I_IN (A)	V_o (V)	I_o(A)	f_OSC (KHz)	D(%)	$\Delta_{IL} (A_{p-p})$
1	0,205	4,208	0,702	502	21,94	0,272

Tabla 23.- Medidas para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)

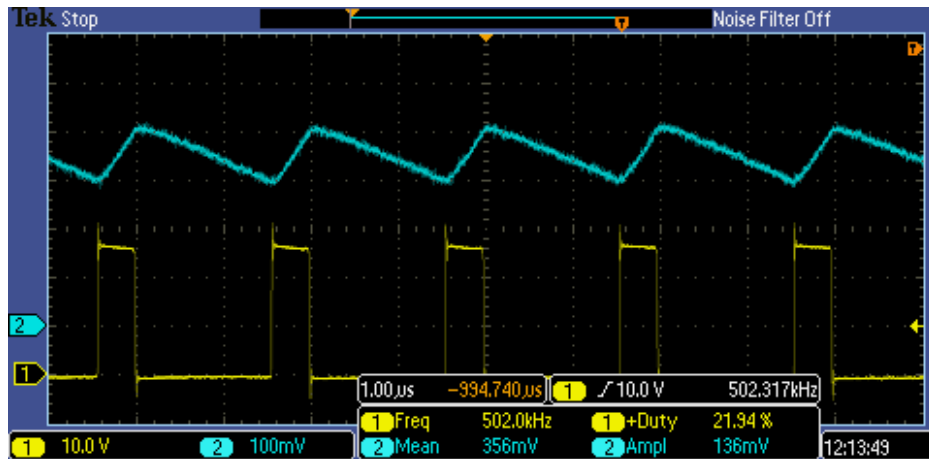


Ilustración 64.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 1, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)

Nº LEDS	I_IN (A)	V_o (V)	I_o(A)	f_OSC (KHz)	D(%)	$\Delta_{IL} (A_{p-p})$
2	0,323	8,148	0,701	534,3	38,43	0,336

Tabla 24.- Medidas para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)

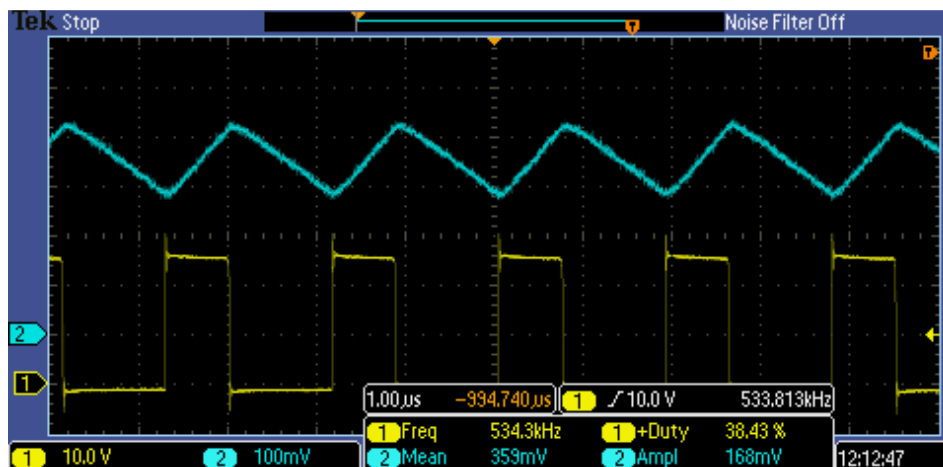


Ilustración 65.- Formas de onda para, Nº de LEDS = 2, $I_{LED} = 0.700\text{ A}$ (LED Azul)

Nº LEDS	I_IN (A)	V_o (V)	I_o(A)	f_OSC (KHz)	D(%)	$\Delta_{IL} (A_{p-p})$
5	0,603	19,424	0,645	575,2	85,25	0,208

Tabla 25.- Medidas para, N° de LEDS = 5, $I_{LED} = 0.700$ A (LED Azul)

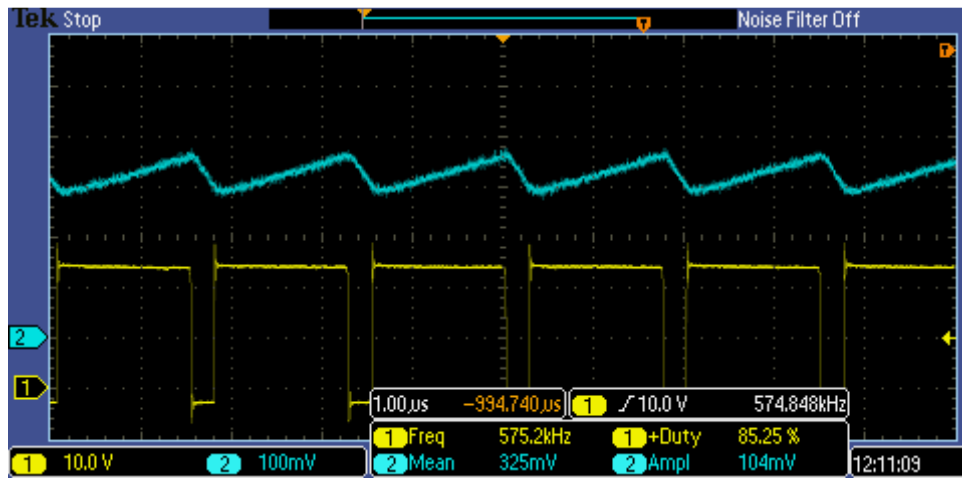


Ilustración 66.- Formas de onda para, N° de LEDS = 5, $I_{LED} = 0.700$ A (LED Azul)

6.5.- Resultados de las pruebas propias del Convertidor

La Tabla siguiente muestra los datos de los resultados de los ensayos realizados en las pruebas descritas anteriormente

		$I_{LED} = 0.350 \text{ A}$								$I_{LED} = 0.700 \text{ A}$								$I_{LED} = 1 \text{ A}$							
LED Blanco	VIN (V)	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)
	18	0,135	3,15	0,350	299	1996	2,58	1,10	42,70	0,404	6,35	0,701	489	1490	6,57	4,47	68,05	0,63	8,84	1,003	489	1247	11,82	9,00	76,11
	24	0,103	3,15	0,350	355	1826	2,47	1,10	44,60	0,263	6,35	0,702	590	1318	6,46	4,46	69,15	0,63	8,85	1,007	788	1067	11,59	8,92	76,94
	30	0,086	3,14	0,350	443	1588	2,43	1,10	45,39	0,219	6,35	0,703	779	1108	7,27	4,46	61,29	0,63	8,85	1,016	1041	994	11,39	8,87	77,87
LED Rojo	Nº LED	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)	Corriente superior a la permitida por el Array de LED color Rojo							
	1	0,087	2,09	0,350	278	2059	2,09	0,73	35,10	0,147	2,30	0,700	304	1876	3,53	1,61	45,70								
	2	0,119	4,13	0,350	418	1635	2,86	1,45	50,70	0,215	4,51	0,701	457	1504	5,16	3,16	61,30								
	5	0,212	10,2	0,350	856	1019	5,09	3,57	70,25	0,407	11	0,701	924	913	9,77	7,77	78,94								
LED Azul	Nº LED	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)	IIN(A)	Vo(V)	ILED(A)	TON(nS)	TOFF(nS)	PIN(W)	PO(W)	η (%)	Corriente superior a la permitida por el Array de LED color Azul							
	1	0,109	3,46	0,350	332	1805	2,62	1,21	46,31	0,205	4,20	0,702	437	1555	4,92	2,95	60,04								
	2	0,161	6,88	0,350	617	1318	3,86	2,41	62,37	0,323	8,14	0,701	719	1152	7,75	5,71	73,68								
	5	0,314	17,2	0,359	1340	448	7,54	6,19	82,16	0,603	19,4	0,645	1482	256	14,47	12,53	86,57								

Tabla 26.- Resultados de los ensayos propios del convertidor



Funcionamiento del convertidor

A la vista de los datos, se puede observar que el convertidor se comporta tal y como se esperaba, ya que, ante cambios en la carga del convertidor, no producen grandes efectos en la corriente que suministra. Y variaciones en la tensión de entrada no producen cambios en la salida. Salvo para el caso de alimentar 5 LEDs en serie, en el que el convertidor ya no es capaz de regular la corriente que suministra a la carga y tan sólo es capaz de suministrar 645 mA. Esta configuración está por encima del límite de funcionamiento del convertidor bajo esas condiciones de alimentación.

Seguramente, con una tensión de alimentación superior (35 V) el convertidor si sería capaz de alimentar dicha carga.

F.R.L.

En cuanto al factor de regulación de línea (F.R.L.) vemos que es de 0,1 %/V, calculado con los datos del caso más desfavorables, para el caso de LED de 10W alimentado a 1A, que es cuando más varía la corriente por la carga.

F.R.C.

El factor de regulación de carga, alcanza un valor para el peor caso de 0,2 %/V, que se da cuando el convertidor alimenta a 5 LEDs azules en serie con una corriente de 0.350 A

Rendimiento

En cuanto al rendimiento del convertidor, η , se observa que el rendimiento de la conversión es mayor cuanto mayor es la tensión a la salida del convertidor. El mejor rendimiento, con el driver funcionando correctamente, es del 78,94 %, se obtiene cuando el convertidor alimenta a 5 LEDs rojos en serie con una corriente de 0.7 A.

Capítulo 7.- Conclusiones

En este capítulo se extraen conclusiones a partir de los resultados experimentales de las pruebas realizadas sobre el sistema y se comprueba en qué grado se han cumplido con los objetivos propuestos del proyecto.

En general, se han alcanzado todos los objetivos que se habían propuesto al inicio del proyecto:

- Se ha diseñado y construido con éxito un sistema válido y acorde con la normativa actual vigente, con el que poder realizar ensayos con LEDs de alto brillo o HBLEDs.
- Se ha profundizado en el estado actual de la técnica sobre los HBLEDs, no sólo desde un punto de vista tecnológico, sino que también se ha investigado gran parte de sus aplicaciones para iluminación general.
- El sistema es controlable desde un PC a través de una consola que sirve de interfaz con el usuario. Desde ésta es posible enviar consignas hacia el sistema y recibir, simultáneamente, información acerca del mismo por la pantalla del PC. Todo ello con unas prestaciones de exactitud en la medida de corriente, así como la precisión de las consignas enviadas al driver del sistema.

En cuanto a las prestaciones propias del convertidor cabe destacar el buen funcionamiento general del mismo, así como la buena respuesta obtenida en la regulación de la potencia que se entrega a la carga. A pesar de la aparente sencillez del circuito, se debe tener en cuenta que es la combinación del “mundo real” (el analógico) con el mundo digital, y ambos conviven en armonía en un reducido espacio físico, como es el PCB que implementa la circuitería del sistema.

También cabe destacar el éxito conseguido en el reto que suponía al inicio, el diseño y fabricación del PCB, habida cuenta de las restricciones impuestas en cuanto al factor de forma y dimensiones del mismo, dada la concepción de sistema modular apilable que se especificó desde el principio. Con esta filosofía de diseño en mente, se han destinado recursos y previsto sistemas para la regulación de la temperatura del LED, así como también sistemas de cuantificación espectral de la luz emitida en la misma placa de circuito impreso. La implementación de la totalidad de las funcionalidades no se ha abordado, ya que dada su extensión quedaban fuera del alcance de un proyecto de estas características, por lo que se proponen como futuras ampliaciones del sistema a desarrollar por terceros en futuros proyectos similares a este.

Finalmente mencionar el buen funcionamiento de la consola de interfaz con el usuario, desde el protocolo de comunicación hasta el diseño de la pantalla de visualización de los datos.

Anexos a la memoria

A.1.- Factor de conversión de los datos de los convertidores analógicos digitales.

Para obtener un valor de corriente legible en amperios, es necesario multiplicar las cuentas que transmite el ADC del bloque *monitorización y control* por un factor de conversión.

El circuito que adapta la corriente que alimenta el LED es el siguiente:

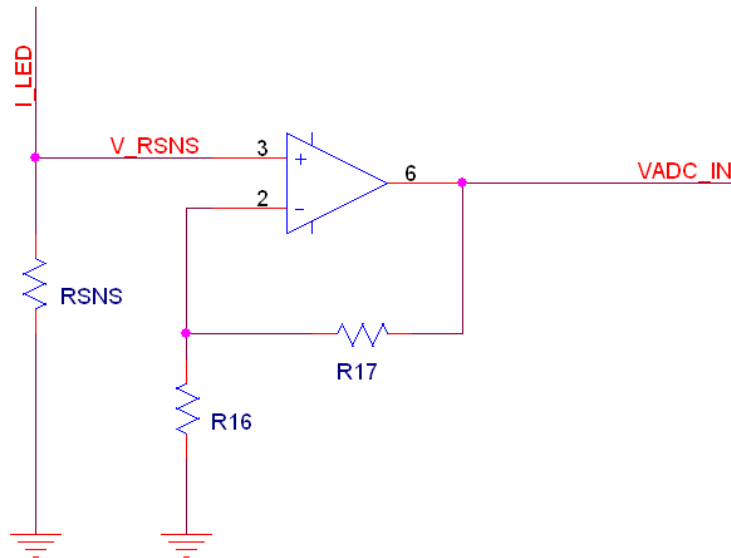


Ilustración 67.- Circuito de adaptación ADC

Del circuito de la ilustración anterior, se pueden determinar las siguientes ecuaciones:

$$V_{RSNS} = R_{SNS} \cdot I_{LED}$$

$$V_{ADCIN} = V_{RSNS} \cdot \left(1 + \frac{R_{17}}{R_{16}}\right)$$

La información digitalizada por el ADC y que nos da la información acerca de la corriente que circula por el LED, es en forma de cuentas del ADC, por lo que para conocer el valor real de esa corriente se aplicará un factor de conversión al número de cuentas del ADC.

$$I_{LED}(A) = Cuentas_{ADC} \cdot Factor\ de\ Conversión \left[\frac{A}{Cuenta} \right]$$

$$\text{Factor de Conversión} = \frac{V_{Ref.ADC}}{2^N \cdot \left(1 + \frac{R_{17}}{R_{16}}\right) \cdot R_{SNS}}$$

Dónde:

- N, es el número de bits del convertidor
- $V_{Ref.ADC}$ es la tensión de referencia del convertidor

Todos los valores son conocidos:

N = 12 bits

$V_{Ref.ADC} = 5V$

$R_{SNS} = 0.5 \text{ Ohmios}$

$R_{17} = 10K \text{ Ohmios}$

$R_{16} = 4.3K \text{ Ohmios}$

Por tanto:

El factor de conversión de los datos de corriente que circula por el LED es:

Factor de Conversión = $7.341291521 \cdot 10^{-4}$

A.2.- Software de programación de la placa ARDUINO

El siguiente código fuente ha sido programado y compilado para ser ejecutado únicamente en el microcontrolador ARDUINO.

```
#include <SPI.h>
```

```
// Declaracion de variables
```

```
int dat, c = 0;
```

```
word data,value =0;
```

```
float a,b=0;
```

```
word dir, datato,datosx =0;
```

```
byte paralelo,dat1,dat2,x,y =0;
```

```
boolean on,par = true;
```

```
int pwm1=7;// asigno pines a las PWM
```

```
int pwm2=6;// asigno pines a las PWM
```



```
int pwm1val=0; // variable que lleva el valor de la PWM enable

int pwm2val=0; // variable que lleva el valor de la PWM paralelo

char buff[]="00000000000";

void setup() {

    pinMode(50, INPUT); // pin MISO

    pinMode(51, OUTPUT); // pin MOSI

    pinMode(52, OUTPUT); // pin SCK

    pinMode(53, OUTPUT); // pin SS

    pinMode(pwm1,OUTPUT);

    pinMode(pwm2,OUTPUT);

    SPI.setBitOrder(MSBFIRST);

    SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);

    SPI.setDataMode(SPI_MODE1);

    Serial.begin (9600);

    SPI.begin();

    //Serial3.begin (9600);

} // llave del setup

void loop() {

    Serial.println(data,DEC);

    // saco por pto serie el valor en voltios del adc obtenido desde la funcion leer valor adc

    while (Serial.available()>0) { //mientras esté disponible el puerto serie hago cosas

        for (int i=0; i<10; i++) {

            buff[i]=buff[i+1];

            buff[10]=Serial.read();

            if(par) {

                //esto es un contador booleano para que solo entre las veces pares es parte del protocolo asi no se

                //confunden datos y caracteres de control

                par=false;

                if (buff[10]=='A' && buff[9]!=buff[10]) { ///pwm 1 dimming enable

                    pwm1val=int(buff[9]);

                    pwm2val=pwm2val;
```



```
if (on){
    analogWrite(pwm1,pwm1val);
}
else
    analogWrite(pwm1,0);
    analogWrite(pwm2,pwm2val);
}
else

pwm1val=pwm1val;

if (buff[10]=='B' && buff[9]!=buff[10]) { // pwm2 dimming paralelo
    pwm2val=int(buff[9]);
    pwm1val=pwm1val;
}
else

pwm2val=pwm2val;

if (buff[10]=='C' && buff[9]!=buff[10]){ // escribir en el DAC fijar la corriente
    x=byte(buff[9]); //parte baja

    // le debo pasar la direccion y los datos en variable tipo word 16 bits que puede variar de 0 a
    //65535 aunque el DAC solo es de 12 bit de 0 a 4096

    //y encima en esta aplicacion solo uso la mitad de la tensión disponible del DAC es decir Vref/2
    siendo Vref 2.5V este numero debera variar entre 0 y 2048

    /*escribir en el registro del DAC0 que tiene la direccion 0240*/
}

if (buff[10]=='D' && buff[9]!=buff[10]){
    y=byte(buff[9]); //parte alta

    value=word(y,x); // word (h,l) le paso en una variable word los 12 bits del DAC que va a variar
    //desde 0x0000 a 0x0FFF

    escribirspi(0x0240,value);

    // le debo pasar la direccion y los datos en variable tipo word 16 bits que puede variar de 0 a 65535
    aunque el DAC solo es de 12 bit de 0 a 4096

    //y encima en esta aplicacion solo uso la mitad de la tensión disponible del DAC es decir Vref/2
    siendo Vref 2.5V este numero debera variar entre 0 y 2048

    /*escribir en el registro del DAC0 que tiene la direccion 0240*/
```




```
//debugging por el puerto serie 3

// clearLCD();

//cursorSet(128);

//Serial3.print("TECLADO");

// cursorSet(137);

//Serial3.print(value,HEX);

//Serial3.print(highByte(value) ,HEX);

//cursorSet(139);

// Serial3.print(lowByte(value),HEX);

}

if (buff[10]=='E' && buff[9]!=buff[10]){ // escribir en el DAC, fijar la corriente

    dat2 = int(buff[9]);

    b = float(dat2);

    b = b*8.031372549; // este numero sale de 255 * 16.06277451 = 4096 aprox los 12 bit de
//resolucion del DAC

    // b = b*16.05882353;

    escribirspi(0x0240, b);

    // le debo pasar la direccion y los datos en variable tipo word 16 bits que puede variar de 0 a 65535
//aunque el DAC solo es de 12 bit de 0 a 4096

    //y encima en esta aplicacion solo uso la mitad de la tensión disponible del DAC es decir Vref/2
//siendo Vref 2.5V este numero debera variar entre 0 y 2048

    /*escribir en el registro del DAC0 que tiene la direccion 0240*/

    //debugging por el Puerto serie3

    //clearLCD();

    // cursorSet(128);

    // Serial3.print("SLIDER");

    // cursorSet(136);

    // Serial3.print(int (b),HEX);

}

if (buff[10]=='F' && buff[9]!=buff[10]){ //enciendo o no el led con el booleano on
```



```
        c=int(buff[9]);

        if(c>=5){

            on = true;

        }else

            on =false;

        }

    }else //llave del contador booleano

        par=true;

    //el arduino envia por puerto serie siempre la lectura del registro del ADC ch2 por spi

        data = leerspi(0x8080); // aqui va dir

        data = data - 0x5000; // le quito el priner byte que es el que dice cual es el ADC y si es valida la
        //conversion, lo que queda es el resultado de la converion del ADC 12 bits el CH2

    } //llave del while

} // llave del loop

//FUNCIONES PARA TRABAJAR CON EL PUERTO SPI

/*Funcion leer un registro del AMC7820 hay que decirle la dirección en una palabra de 16-bit y te
devuelve el dato leido en otra palbra de 16-bit*/

word leerspi (word direccion)

{

    word dato =0;

    byte dir1 = 0;

    byte dir2 = 0;

    byte w1=0;

    byte w2=0;

    dir1 = lowByte (direccion); //parte baja de direccion

    dir2 = highByte (direccion); // parte alta de direccion

    // mando comando leer

    digitalWrite(53, LOW); // pongo SS a bajo nivel

    SPI.transfer(dir2);

    SPI.transfer(dir1);

    w1= SPI.transfer(dir2); //aqui leo lo que entra por miso
```



```
w2=SPI.transfer(dir1);

digitalWrite(53, HIGH); //levanto SS para dar por acabada la comunicación

dato = word (w1,w2); // convierto los dos bytes en un word de 16 bits
}

/*Funcion escribir un registro del AMC7820 hay que decirle la dirección y los datos a escribir en
palabras de 16-bit y no te devuelve nada claro */

void escribirspi(word direccion, word datos)
{
    byte dir1 = 0;
    byte dir2 = 0;
    byte dat1 = 0;
    byte dat2 = 0;
    byte w1=0;
    byte w2=0;
    word dato =0;
    int j=0;
    do{
        dir1 = lowByte (direccion); //parte baja de direccion
        dir2 = highByte (direccion); // parte alta de direccion
        dat1 = lowByte (datos);
        dat2 = highByte (datos);
        digitalWrite(53, LOW); // pongo SS abajo nivel
        SPI.transfer(dir2);
        SPI.transfer(dir1);
        SPI.transfer(dat2); //aqui leo lo que entra por miso
        SPI.transfer(dat1);
        digitalWrite(53, HIGH); //levanto SS para dar por acabada la comunicación
        // me aseguro que se ha escrito si no se repite otra vez hasta que salga
        dir2 = dir2 + 0x80 ; // ojo tengo que leer no escribir
        digitalWrite(53, LOW); // pongo SS abajo nivel
```



```
SPI.transfer(dir2);

SPI.transfer(dir1);

w1= SPI.transfer(dir2); //aqui leo lo que entra por miso
w2=SPI.transfer(dir1);

digitalWrite(53, HIGH); //levanto SS para dar por acabada la comunicación

dato = word (w1,w2); // convierto los dos bytes en un word de 16 bits

j = datos - dato ;
}

while(j!=0); // me aseguro que lo escribe ya que leo lo que escribo antes de salir
}

/*-----*/

// funciones del LCD por puerto serie ojo este esta conectado en puerto 3 para debugear

// borrar el LCD
void clearLCD() {
  Serial3.print(254,BYTE);
  Serial3.print(1, BYTE);
  delay(2);
}

// empezar una linea nueva
void cursorLine2() {
  Serial3.print(254,BYTE);
  Serial3.print(192, BYTE);
  delay(2);
}

// mover el cursor a la pos inicial
void cursorHome() {
  Serial3.print(254, BYTE);
  Serial3.print(128, BYTE);
  delay(2);
```



```
}  
  
// mover el cursor a una posicion especifica  
  
// la Linea 1 empieza en 128, y va hasta la linea 144; la Linea 2 empieza en 192, hasta la 208  
  
void cursorSet(int addr) {  
  Serial3.print(254, BYTE);  
  Serial3.print(addr, BYTE);  
  delay(2);  
}  
  
//encender luz trasera pantalla  
  
void backOn(){  
  Serial3.print(124,BYTE);  
  Serial3.print(157,BYTE);  
  delay(2);  
}  
  
//apagar luz trasera pantalla  
  
void backOff(){  
  Serial3.print(124,BYTE);  
  Serial3.print(128,BYTE);  
  delay(2);  
}  
  
//poner luz trasera pantalla al 40%  
  
void backAt40(){  
  Serial3.print(124,BYTE);  
  Serial3.print(140,BYTE);  
  delay(2);  
}  
  
//poner luz trasera pantalla al 73%  
  
void backAt73(){  
  Serial3.print(124,BYTE);  
  Serial3.print(150,BYTE);
```



```
delay(2);  
}
```

A.3.- Software de programación del Interfaz consola de PC

El siguiente código fuente ha sido programado y compilado para ser ejecutado un PC.

```
import processing.serial.*; // function que permite comunicarse con el Puerto serie  
  
// declaración de variables de programa  
  
float num,rep,rep2,maxi , mini ,media,sum,porcentaje,value =0;  
  
int lf = 10;  
  
String myString=null;  
  
boolean haydatos,dimming,encendido, selected,slider,curso= false;  
  
int t=20;//tamaño del array para gestionar datos  
  
float[] datos=new float[t];  
  
float k, numant,setcorriente,auxf,auxe =0;  
  
int i,estado,paralelo,enable, conta,divisor,pos1,pos2,porcentaje100,z,q,delta =0;  
  
int baja,alta,aux,baj=0x00;  
  
// color del texto rgb  
  
int R=113;  
  
int G=129;  
  
int B=180;  
  
float prueba=0;  
  
String lista[];  
  
long corriente=0;  
  
int altab,bajab;  
  
PImage a;  
  
PImage b;  
  
PImage c;  
  
PImage d;  
  
PImage e;
```



```
PImage f;

Serial port;

slider s1;

slider s2;

// Variable para almacenar texto mientras se escribe

String typing = "";

// Variable almacenar el texto ya escrito

float saved = 0;

PFont fontA;

void setup() {

    size(500, 450);

    smooth();

    fontA = loadFont("FuturaLT-Book-25.vlw");

    textFont(fontA, 16);

    //println("Available serial ports:");

    //println(Serial.list());

    lista = Serial.list(); // meto en array los puertos com disponibles

    z=lista.length-1; // me cojo el ultimo puerto com que haya, en el futuro hacer una ventana de
//seleccion

    //println(lista);

    //text(z,290,157);

    // hacer una ventana para seleccionar el puerto com

    port = new Serial(this, Serial.list()[z], 9600);

    port.bufferUntil(lf); //lee y mete en un buffer hasta que recibe el 10 que es retorno de carro en ascii y
//para

    s1=new slider(80,145,255, color(245,110,110));

    //s2=new slider(200,20,255, color(255,255,255));

    s2=new slider(180,145,255, color(94,107,173));

    //s4=new slider(400,20,10, color(0,255,0));

    //color(0,255,0);

    a = loadImage("BOTONON.jpg");
```



```
b = loadImage("BOTONOFF.jpg");

c= loadImage("MAIN.jpg");

e= loadImage("TARGET ACTIVA.jpg");

f= loadImage("MAIN2.jpg");

// llave del setup

void draw() {

    background(255);

    if(selected){

        image(f, 0, 0);

    }else{

        image (c,0,0);

    }

    noFill();

    stroke(180,180,180);

    rect (0,0,500,450);

    // miro la posicion de los sliders con la funcion render

    s1.render();

    if (selected==false){

        s2.render();

    }

    //saved es un float que es la variable de consigna de corriente

    if (saved <= 0.230){ //si lo que he tecleado es menor de 0.230 es 0 ya que 0.230 es el mínimo de
//corriente que da el driver

        auxe=0;

    }else{ /// si es mayor por contra le quito 0.200 que es el minimo, este valor es ajustado
experimentalmente ya que debería ser 0.230 pero no sale clavado 0.200

        auxe=saved-0.200;

    }

    //debugging

    // print("saved + 0.230 ");
```




```
// println (auxe);

aux = int(((auxe)/2.50)*4096);


//debugging
// print("Aux ");
// println(aux*0.000612792);


// lo parto para mandarlo por puerto serie
//ejemplo FFD
alta= aux >> 8; // desplazo a la derecha 8 bits 1111 1111 1101 paso a 1111 esto funciona bien
baja=aux - (alta << 8); //ahora esto es 1111 1111 1101 - 1111 0000 0000 = EFE 0000 1111 1101
// esto es para diferenciar el dimming paralelo del dimming enable si dimming true es paralelo si no
//es enable
if (dimming){
    pos1=255;
    pos2=s1.p;
}else{
    pos1=255-s1.p;
    pos2=0;
}
//debuging
//println ("-----");
//println(hex (altab));
//println(hex(bajab));
//println ("-----");
//println(hex(aux));
//println(int(auxf));

// Empezamos a leer del puerto serie cuando haya datos y sean diferentes  && num!=numant
if(haydatos){
    //desplazo hacia la izqda para ir guardando en el array los valores del pto serie
    for (int b=1; b<datos.length;b++){
```



```
    datos[b-1] = datos[b];
}

datos[datos.length-1]=num; //leo y almaceno en el array lo que viene por el puerto serie

// Debuging
// numant = num; // para ver si es diferente y son datos nuevos
//print("he leído ");
//println (conta +1);
    haydatos=false;
    conta++;
    delay(10);
}

// Filtro media mediana
//ordeno de menor a mayor
if (conta==datos.length){// entro solo si he hecho diez veces conta
    // Ordeno de menor a mayor
    datos = sort(datos);
    //Debuging
    //println ("datos ordenados:");
    //println (datos);
    //println ("-----");
    //opero
    mini=datos[0];// El mín es el tercero descarto los valores mas bajos por si son ruido
    maxi=datos[datos.length-1]; //El max es el antepenúltimo descarto los mas altos por el mismo motivo que el min
    // Calculo la media medianera
    for (int a=1; a<datos.length-1 ;a++){
        sum=sum+datos[a];
    }
    divisor = datos.length - 2; // divido entre lo largo del array menos 2 porque no los sume ni el primero ni el ultimo por si son atipicos
```



```
media=sum/divisor;

media = media -9.6121314E-4;

sum=0;

conta=0;

} //llave del if de conta

if(dimming){

fill (R,G,B); // color del texto

text("Bypass",400,112);

}

if(dimming==false){

fill (R,G,B); // color del texto

text("Enable",400,112);

}

if (dimming){

text("Bypass",40,100);

}else

text("Enable",40,100);

//boton de encendido

if(encendido){

image(a, 380, 20);

//image(b, 365, 40, b.width/8, b.height/8);

smooth();

//ellipse(400,60,30,30);

}

else{

image(b, 380, 20);

}

fill (R,G,B); // color del texto

//map(value, low1, high1, low2, high2)

porcentaje = map(s1.p,0,255,0,100);
```



```
porcentaje100= 100-int(porcentaje);
text(porcentaje100,57,127);

setcorriente=map(s2.p,0,255,13,100); /// Ajuste del slider corriente desde 13% a 100%

  if(selected==false){
    fill(205,73,59);
    text(int(setcorriente),157,127);
  }
  else{
    image(e, 259, 200);
  }
  if (encendido){
    estado=10;
  }else{
    estado=0;
  }
  fill (164,176,216); // color del texto   *(porcentaje100/100)
//representación de la corrinete con dimming enable y bypass
  if ((porcentaje100!=100)&&(!dimming)){
    //println (max(datos));
    prueba=(max(datos)*(porcentaje100)/100);
    //println (prueba);
    text(prueba,390,322);
  }else
    text(media,390,322);
  text(lista[z],400,150); // saco el puerto en el que estoy
  if( selected){
    fill (R,G,B);
    // este es el cursor mientras escribes y el texto
    text(typing+{frameCount/10 % 2 == 0 ? "_" : ""}, 390, 238);
  }
```



```
fill(164,176,216);

text(saved,390,285);

// código paraqué el cursor que sea la flecha o la mano....

if ((mouseX >= 64 && mouseX <= 96) && (mouseY >= 140 && mouseY <= 405) || (mouseX >= 162 &&
mouseX <= 192) && (mouseY >= 140 && mouseY <= 405) || (mouseX >= 388 && mouseX <= 463) &&
(mouseY >= 92 && mouseY <= 120) || (mouseX >= 360 && mouseX <= 463) && (mouseY >= 208 &&
mouseY <= 254) || (mouseX >= 415 && mouseX <= 466) && (mouseY >= 20 && mouseY <= 70)){

    cursor (HAND);

}else {cursor (ARROW);}

//envío la posicion de los sliders

// envío por puerto serie datos y caracteres de control

port.write(pos1); // dimming enable

port.write('A');

port.write(pos2); // dimming paralelo

port.write('B');

// este if es para diferenciar la consigna de corriente de slider 8 bits de la de teclado 12 bits de
resolución

if(selected){

    port.write(baja); // consigna de corriente de 12bits parte baja byte bajo s2.p

    port.write('C');

    port.write(alta); // consigna de corriente parte alta byte alto

    port.write('D');

}else{

    port.write(s2.p); // consigna de corriente 8bits

    port.write('E');

}

port.write(estado); // consigna de encender y apagar

port.write('F');

} // llave del draw que es como el main en C es como el loop del arduino
```



```
/*-----FUNCIONES CLASES Y METODOS-----  
-----*/  
  
void serialEvent(Serial port){  
  
    myString = port.readStringUntil(lf); //lee y mete en un string hasta que recibe el 10 que es retorno de  
    carro en ascii y para  
  
    if (myString != null) { // si lo que ha llegado es diferente de 0  
  
        num=float(myString); // lo convierte en un float  
  
        num=num*7.341291521E-4;  
  
        // 7.341291521. 10-4 sale de V_ADC * (5/4096)* (1/3.33)*2.02 : V/LSB * ganacia del Ampli antes del  
        ADC * valor de la Rsense  
  
        haydatos=true;  
  
    }  
  
}  
  
/* Slider Class - www.anthonymattox.com */  
  
class slider {  
  
    int xpos, ypos, thesize, p;  
  
    boolean slide;  
  
    color c, cb;  
  
    slider (int x, int y, int s, color col) {  
  
        xpos=x;  
  
        ypos=y;  
  
        thesize=s;  
  
        p=0;  
  
        slide=true;  
  
        c=col;  
  
        cb=color(red(c),green(c),blue(c),150);  
  
    }  
  
    void render() {  
  
        //stroke(255); //color del slider  
  
        // strokeWeight(4); //ancho del slider
```



```
//noFill();

//line(xpos,ypos,xpos,ypos+thesize);

//stroke(147,164,215); //color guia slider
//strokeWeight(2); // ancho guia slider
//noFill();

//line(xpos,ypos,xpos,ypos+thesize);

noStroke();

fill(cb);

ellipse(xpos, thesize-p+ypos, 27, 27);

//rect(xpos, thesize-p+ypos, 17, 17);

fill(c);

ellipse(xpos, thesize-p+ypos, 23, 23);

//rect(xpos, thesize-p+ypos, 13, 13);

//text(s2.p,xpos+10,ypos+5);

// replace the +s with double ampersands (web display issues)

if (slide=true && mousePressed==true && mouseX<xpos+15 && mouseX>xpos-15){

  if ((mouseY<=ypos+thesize+10) && (mouseY>=ypos-10)) {

    p=(3*p+(thesize-(mouseY-ypos)))/4;

    if (p<0) {

      p=0;

    } else if (p>thesize) {

      p=thesize;

    }

  }

}

}

void mousePressed() {

  if (mouseX > 388 && mouseX < 464 && mouseY > 94 && mouseY < 120) {

    dimming = !dimming;
```



```
}

if (mouseX > 415 && mouseX < 466 && mouseY > 20 && mouseY < 70) {

    encendido = !encendido;

}

}

void mouseClicked() {

    if (mouseX > 360 && mouseX < 462 && mouseY > 208 && mouseY < 254) {

        selected = !selected;

        }

        if (mouseX > 160 && mouseX < 196 && mouseY > 140 && mouseY < 405) {

            selected = !selected;

        }

    }

}

void keyTyped() {

    // If the return key is pressed, save the String and clear it

    if ((key == '\n') ) {

        value=float (typing);

        if((value>=0.230)&&(value<=1.500)){ //(value>=0.250)&&(value<=1.500)

            saved = value;

            typing = "";

        } else{typing = "";}

    }

    if(key=='\b'){

        typing= "";

    }

    // Otherwise, concatenate the String

    // Each character typed by the user is added to the end of the String variable.

    ||'0' || '1' || '2' || '3' || '4' || '5' || '6' || '7' || '8' || '9'

    if((typing.length()<5)&&(selected)){
```




```
if((key=='.')||(key=='0')||(key=='1')||(key=='2')||(key=='3')||(key=='4')||(key=='5')||(key=='6')||(key==
=='7')||(key=='8')||(key=='9')||(key=='\b')){

    typing = typing + key;

    if(key=='\b' || key=='\n'){

        typing= "";

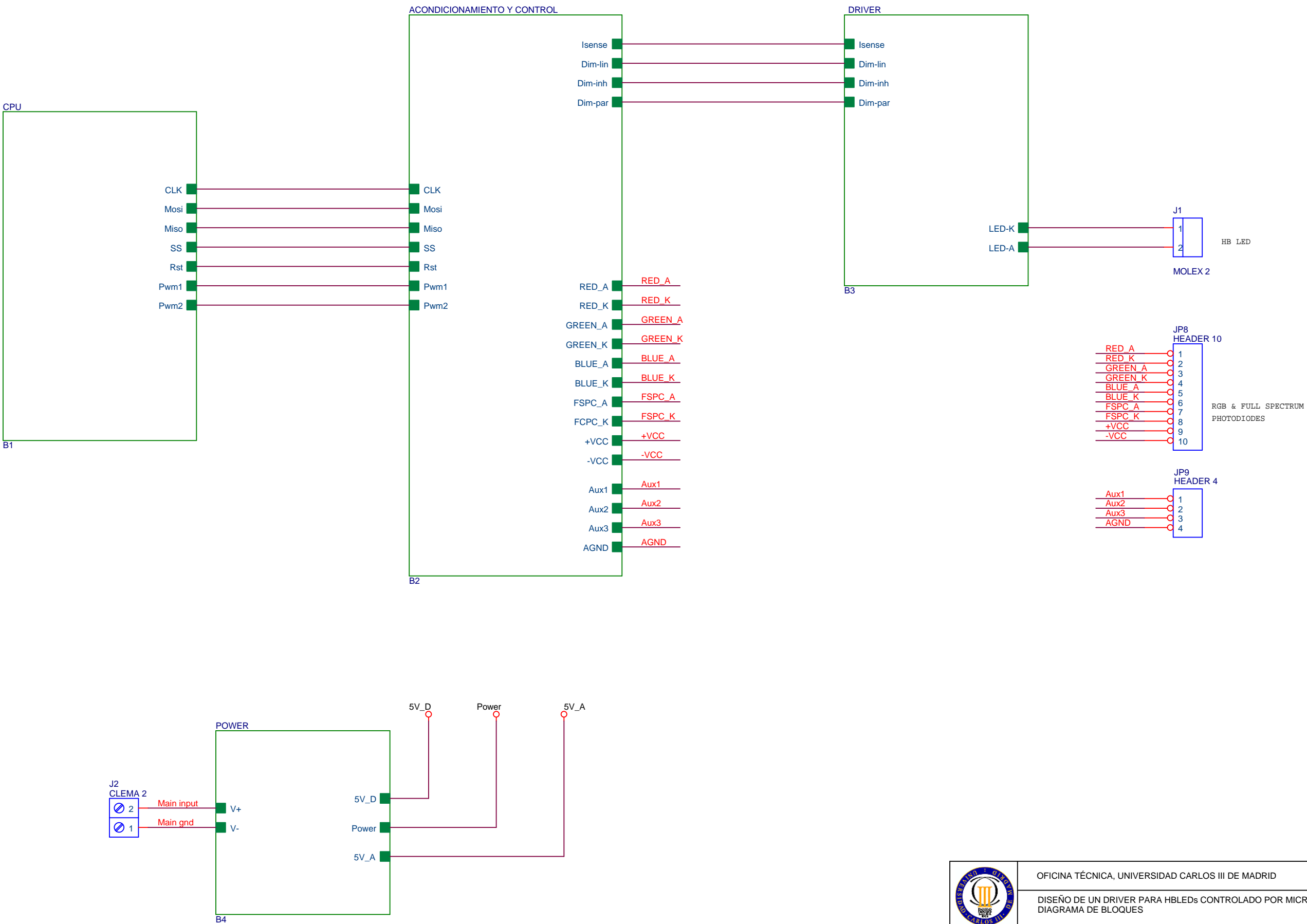
    }

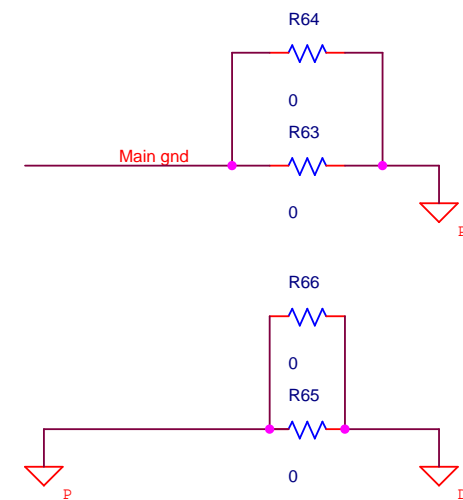
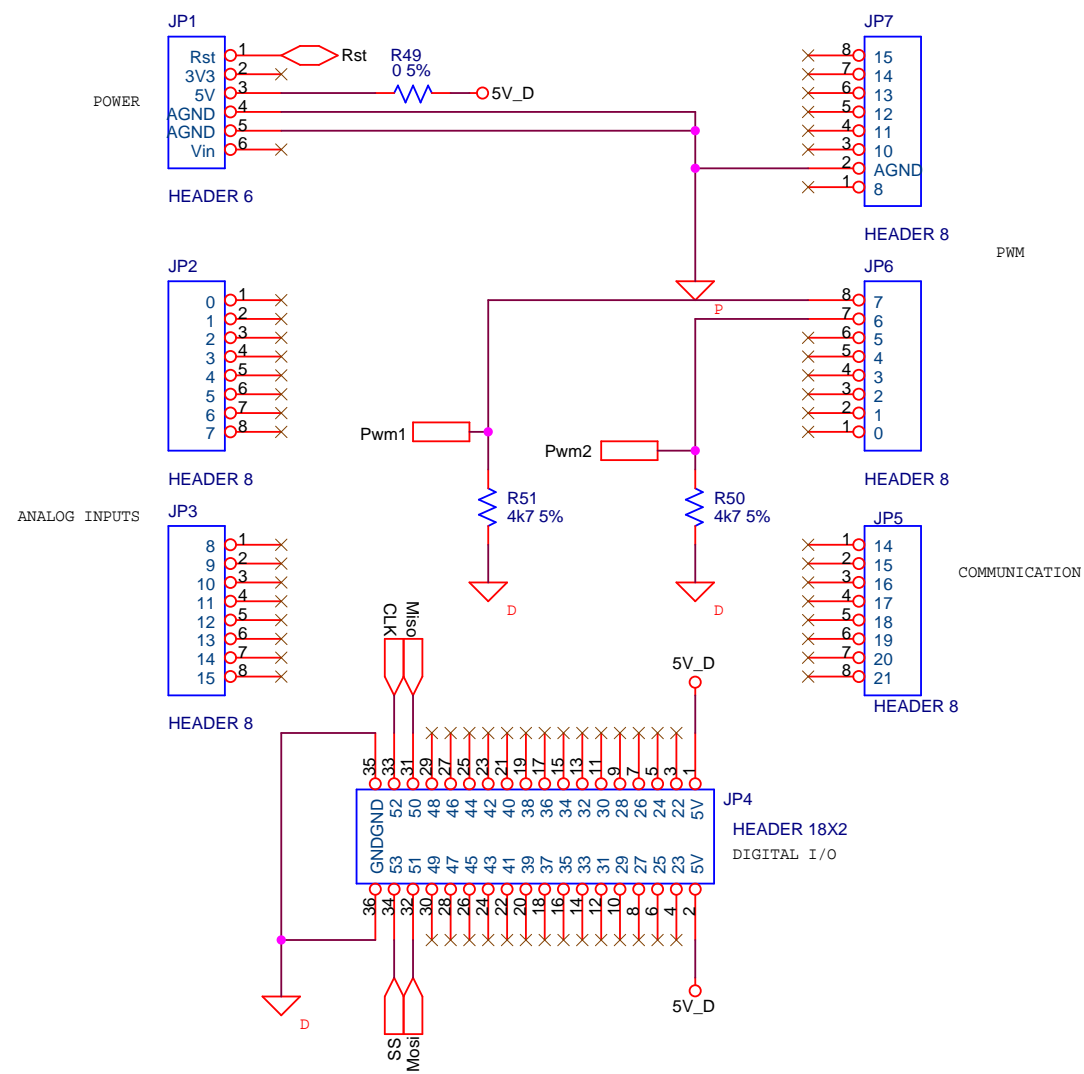
}

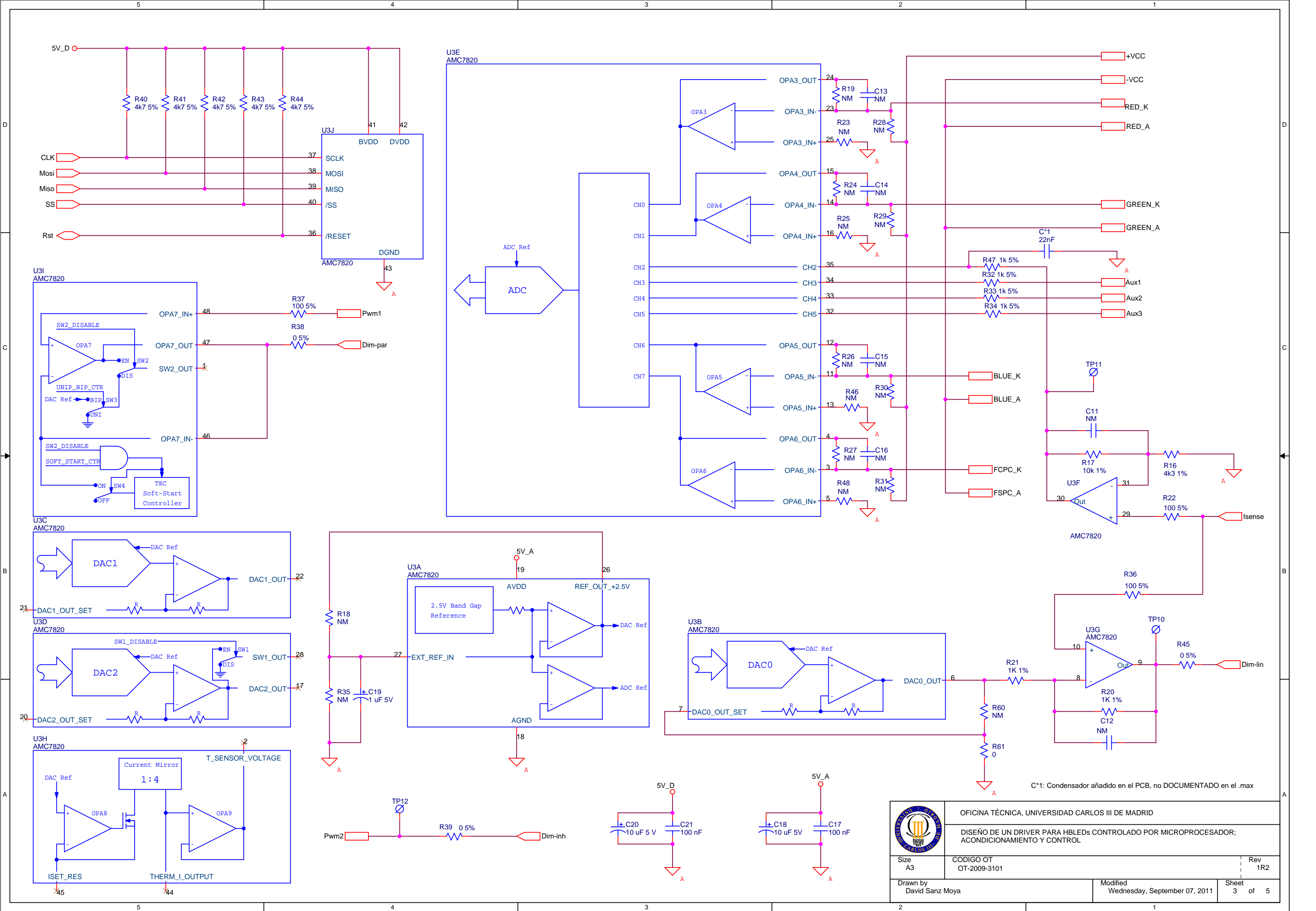
}

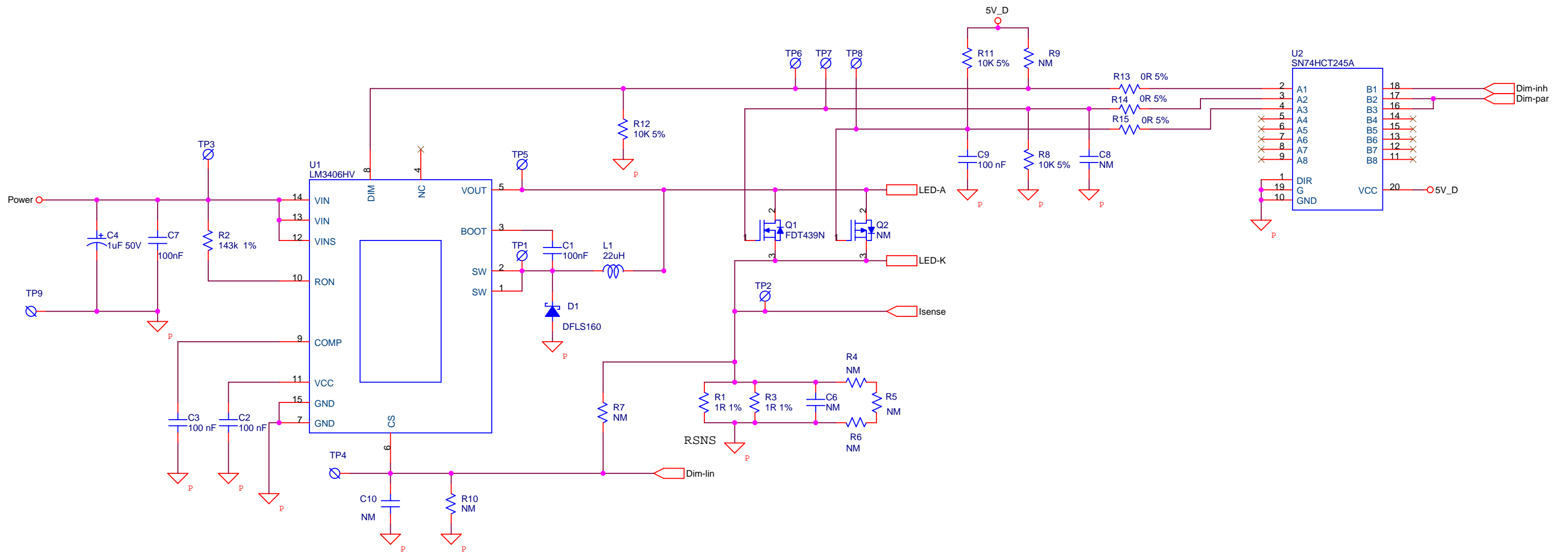
}
```


PLANOS

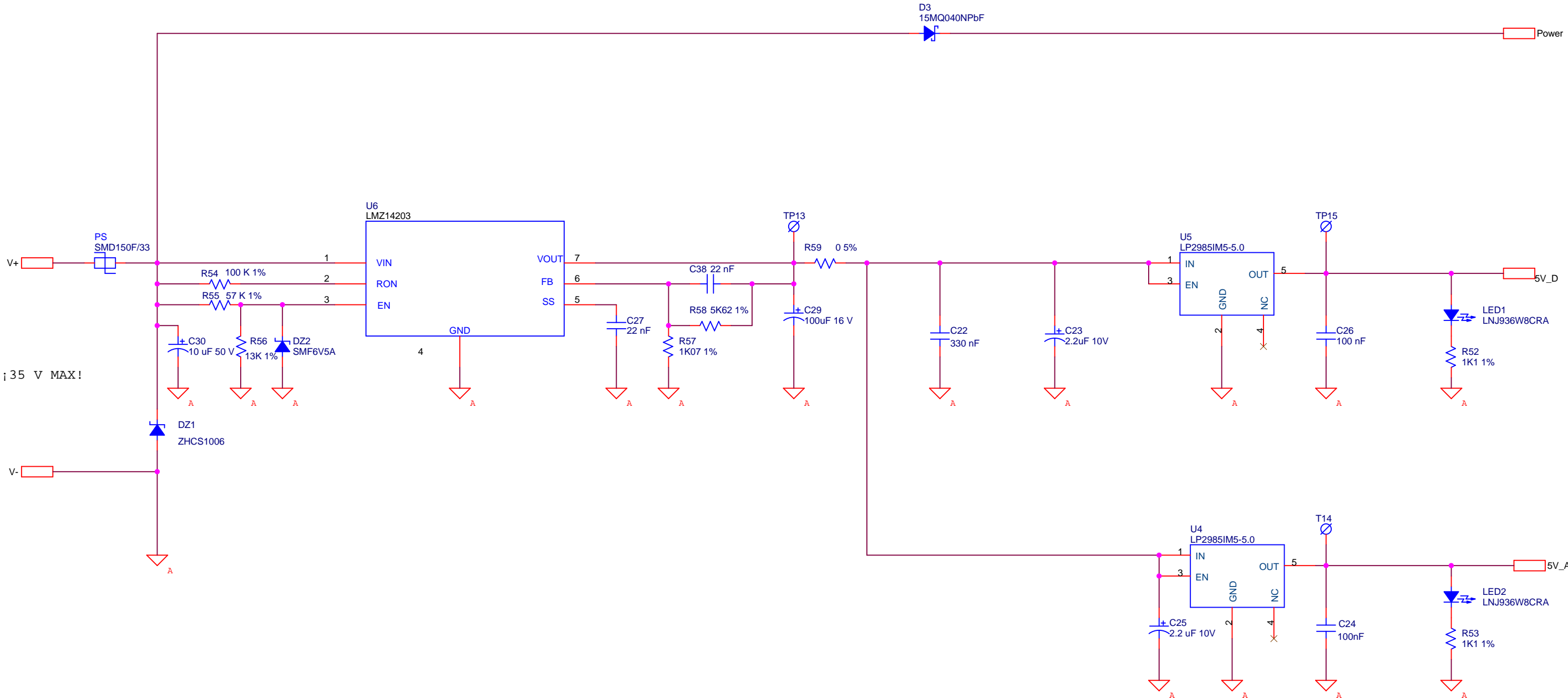








	OFICINA TÉCNICA, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID		
	DISEÑO DE UN DRIVER PARA HBLEDs CONTROLADO POR MICROPROCESADOR; DRIVER		
Size A3	CODIGO OT OT-2009-3101	Rev 1R2	
Drawn by David Sanz Moya		Modified Wednesday, September 07, 2011	Sheet 4 of 5





Pliego de Condiciones

1.- Normativa considerada

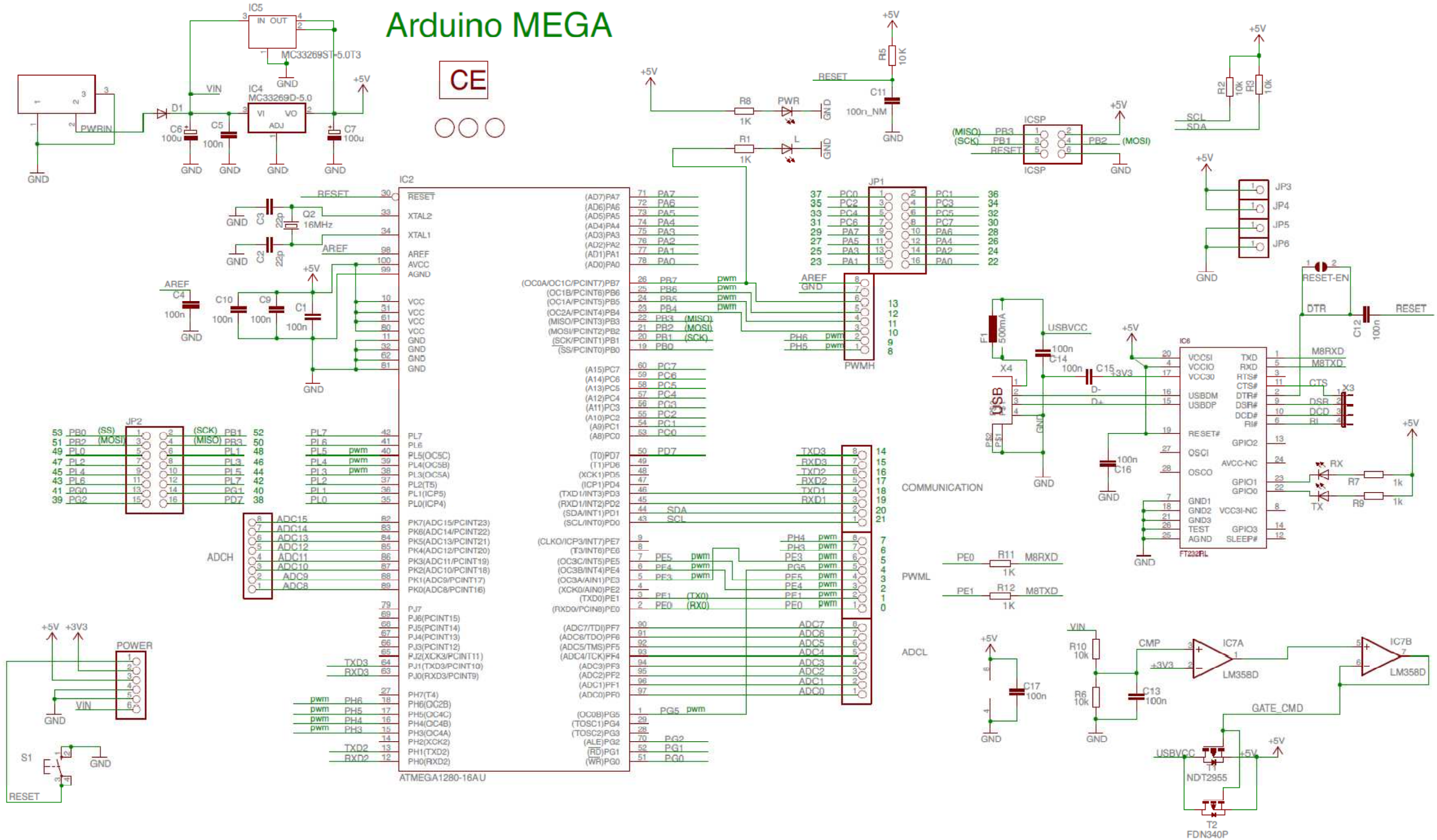
En el diseño de todos los componentes del sistema se han tenido en cuenta todo lo recogido por las normas IESNA LM-80-08 y IESNA LM-79-08 con el objetivo de desarrollar un sistema adecuado para ensayar HBLEDs y conforme a lo especificado en dicha normativa.

2.- El componente ARDUINO

Se asumen como válidos y ciertos tanto los esquemáticos como la fabricación de la circuitería que compone la placa de ARDUINO, no pudiendo considerarse un fallo propio del sistema, aquel que pudiera tener su origen en un fallo particular de este componente del sistema.

Se adjunta el esquema eléctrico del componente utilizado para el diseño del sistema.

Esquema eléctrico de la placa ARDUIN



3.- Hojas de características de los componentes principales

Para el diseño y fabricación de todos los circuitos y la selección de todos los componentes que forman el sistema, se han tenido en cuenta todas las recomendaciones de los fabricantes de los componentes que lo forman. Por no alargar el documento sólo se muestra la primera página de la hoja de características de cada elemento principal.

<http://www.ti.com/lit/gpn/amc7820>



Burr-Brown Products
from Texas Instruments



AMC7820

3BA3231B – MARCH 2002

ANALOG MONITORING AND CONTROL

FEATURES

- 100KHZ SAMPLING RATE 12-BIT ADC
- 8 ANALOG INPUT CHANNELS
- THREE 12-BIT DACS
- NINE OPERATIONAL AMPLIFIERS
- THERMISTOR CURRENT SOURCE
- INTERNAL 2.5V REFERENCE
- SPI SERIAL INTERFACE
- 3V LOGIC COMPATIBLE
- SINGLE +5V SUPPLY
- LOW POWER: 40mW
- TQFP-48 PACKAGE

APPLICATIONS

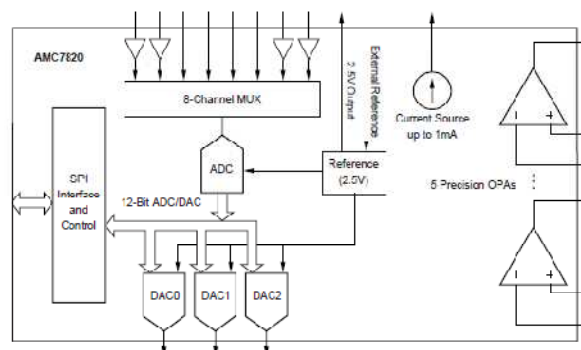
- CW LASER AND PUMP LASER CURRENT CONTROL IN DWDM
- TEC COOLER CURRENT CONTROL IN DWDM
- OPTICAL POWER MONITORING
- TUNABLE LASER

DESCRIPTION

The AMC7820 is a complete analog monitoring and control circuit that includes an 8-channel, 12-bit Analog-to-Digital Converter (ADC), three 12-bit Digital-to-Analog Converters (DACs), nine operational amplifiers, a thermistor current source, an internal +2.5V reference, and an SPI™ serial interface. External reference may be applied. Typical power dissipation is 40mW. For the ADC, the unbuffered analog input range is 0V to +5.0V, and the buffered analog common-mode input range is 0V to +3.8V. For the DACs, the analog output range is 0V to +2.5V or 0V to +5.0V.

The AMC7820 is ideal for multichannel applications where low power and small size are critical. The AMC7820 is available in a TQFP-48 package and is fully specified and tested over the -40°C to +85°C temperature range.

SPI is a trademark of Motorola.




Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS
INSTRUMENTS
www.ti.com

Copyright © 2001, Texas Instruments Incorporated

<http://www.national.com/profile/snip.cgi/openDS=LM3406>



LM3406/06HV

February 8, 2010

1.5A Constant Current Buck Regulator for Driving High Power LEDs

General Description

The LM3406/06HV are monolithic switching regulators designed to deliver constant currents to high power LEDs. Ideal for automotive, industrial, and general lighting applications, they contain a high-side N-channel MOSFET switch with a current limit of 2.0A (typical) for step-down (Buck) regulators. Controlled on-time with true average current and an external current sense resistor allow the converter output voltage to adjust as needed to deliver a constant current to series and series-parallel connected LED arrays of varying number and type. LED dimming via pulse width modulation (PWM) is achieved using a dedicated logic pin or by PWM of the power input voltage. The product feature set is rounded out with low-power shutdown and thermal shutdown protection.

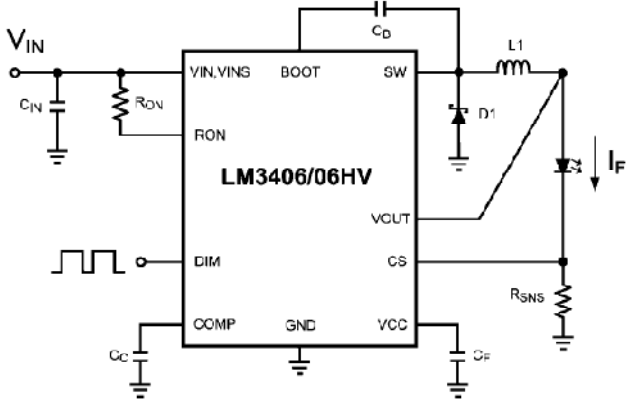
Features

- Integrated 2.0A MOSFET
- V_{IN} Range 6V to 42V (LM3406)
- V_{IN} Range 6V to 75V (LM3406HV)
- True average output current control
- 1.7A Minimum Output Current Limit Over Temperature
- Cycle-By-Cycle Current Limit
- PWM Dimming with Dedicated Logic Input
- PWM Dimming with Power Input Voltage
- Simple Control Loop Compensation
- Low Power Shutdown
- Supports All-Ceramic Output Capacitors and Capacitorless Outputs
- Thermal Shutdown Protection
- eTSSOP-14 Package

Applications

- LED Driver
- Constant Current Source
- Automotive Lighting
- General Illumination
- Industrial Lighting

Typical Application




© 2010 National Semiconductor Corporation 300203

www.national.com

LM3406/06HV 1.5A Constant Current Buck Regulator for Driving High Power LEDs


<http://www.national.com/profile/snip.cgi/openDS=LMZ14203>




June 16, 2011

LMZ14203

3A SIMPLE SWITCHER® Power Module with 42V Maximum Input Voltage



Top View



Bottom View

TO-PMOD 7 Pin Package
 10.16 x 13.77 x 4.57 mm (0.4 x 0.542 x 0.18 in)
 $\theta_{JA} = 20^{\circ}\text{C/W}$, $\theta_{JC} = 1.9^{\circ}\text{C/W}$
 RoHS Compliant

Electrical Specifications

- 18W maximum total output power
- Up to 3A output current
- Input voltage range 6V to 42V
- Output voltage range 0.8V to 8V
- Efficiency up to 90%

Key Features

- Integrated shielded inductor
- Simple PCB layout
- Flexible startup sequencing using external soft-start and precision enable
- Protection against inrush currents and faults such as input UVLO and output short circuit
- -40°C to 125°C junction temperature range
- Single exposed pad and standard pinout for easy mounting and manufacturing
- Fast transient response for powering FPGAs and ASICs
- Low output voltage ripple
- Pin-to-pin compatible family:
 LMZ14203/2/1 (42V max 3A, 2A, 1A)
 LMZ12003/2/1 (20V max 3A, 2A, 1A)
- Fully enabled for Webench® Power Designer

Applications

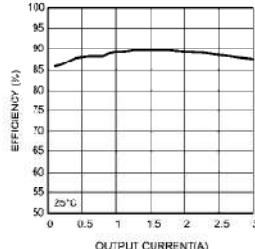
- Point of load conversions from 12V and 24V input rail
- Time critical projects
- Space constrained / high thermal requirement applications
- Negative output voltage applications (See AN-2027)

Performance Benefits

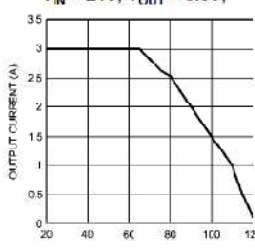
- Operates at high ambient temperature with no thermal derating
- High efficiency reduces system heat generation
- Low radiated emissions (EMI) complies with EN55022 class B standard
- Passes 10V/m radiated immunity EMI test standard EN61000 4-3

System Performance

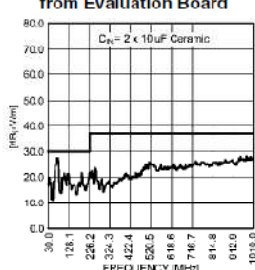
Efficiency $V_{IN} = 24V$ $V_{OUT} = 5.0V$



Thermal Derating Curve $V_{IN} = 24V$, $V_{OUT} = 5.0V$



Radiated Emissions (EN 55022 Class B) from Evaluation Board



LMZ14203 3A SIMPLE SWITCHER® Power Module with 42V Maximum Input Voltage

© 2011 National Semiconductor Corporation 301070

www.national.com

http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2549.pdf

Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
 - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 64K/128K/256KBytes of In-System Self-Programmable Flash
 - 4Kbytes EEPROM
 - 8Kbytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
 - Endurance: Up to 64Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® QTouch® library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix® acquisition
 - Up to 64 sense channels
- JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare- and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four 8-bit PWM Channels
 - Six/Twelve PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Output Compare Modulator
 - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 54/86 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - 64-pad QFN/MLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
 - 100-lead TQFP, 100-ball CBGA (ATmega640/1280/2560)
 - RoHS/Fully Green
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 1MHz, 1.8V: 500µA
 - Power-down Mode: 0.1µA at 1.8V
- Speed Grade:
 - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
 - 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega2560V/ATmega2561V:
 - 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
 - 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V
 - ATmega2560/ATmega2561:
 - 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V



**8-bit Atmel
Microcontroller
with
64K/128K/256K
Bytes In-System
Programmable
Flash**

**ATmega640/V
ATmega1280/V
ATmega1281/V
ATmega2560/V
ATmega2561/V**

Preliminary

2549N-AVR-05/11





4.- Técnicas de soldadura empleadas para la fabricación del circuito impreso

Aquí se recogen las técnicas llevadas a cabo para el montaje de los componentes del circuito impreso.

Para la soldadura y montaje de los componentes que forman el circuito, se han empleado diferentes técnicas. Todos los componentes se han situado sobre el PCB de forma manual y se han soldado utilizando estaño con plomo por tratarse de un prototipo y disolvente flux al agua.

Para el montaje de los componentes se ha empleado una estación de soldadura profesional JBC AD2950 que alcanza una temperatura de hasta 400 grados centígrados y se han utilizado puntas de soldadura de los modelos C245-039 y C245-030.

Ha sido necesario el uso de un horno industrial de soldadura por aire caliente para el integrado LM3406 (ver 3.3.1.1.- Diseño del control del convertidor empleando el integrado LM3406), dado que tiene un pin térmico centrado en la parte inferior del componente que debe ser soldado a un plano de masa, y es por este hecho que se ha tenido que emplear esta técnica en este caso puntual.

Se han respetado todos los perfiles térmicos de soldadura recomendados por los fabricantes de todos los componentes durante el montaje de los elementos del sistema.

Presupuesto



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: **DAVID SANZ MOYA**

2.- Departamento: **TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

3.- Título del Proyecto:

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS CON INTERFAZ A PC PARA ENSAYOS DE HBLED'S

- Duración (meses): 24

Tasa de costes Indirectos:

20%

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros sin I.V.A.):

35.949,02 €

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^{a)}	Coste hombre mes	Coste (Euro)
GARCÍA ARES, ERNESTO		Ingeniero Se	0,5	4.289,54 €	2.144,77 €
SANZ MOYA, DAVID		Ingeniero	10	2.694,39 €	26.943,90 €
Hombres mes			10,5	Total	29.088,67 €

^{a)} 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)

Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
OSCILOSCOPIO LABORATORIO	2.700,00 €	10	6	60	27,00 €
POLIMETRO LABORATORIO	1.200,00 €	20	6	60	24,00 €
ESTACIÓN SOLDADURA SMD	1.200,00 €	10	6	60	12,00 €
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	1.500,00 €	20	6	60	30,00 €
ORDENADOR PERSONAL	1.000,00 €	100	10	60	166,67 €
Total					259,67 €

^{d)} Fórmula de cálculo de la Amortización:

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS		
Descripción	Empresa	Coste imputable
FABRICACIÓN DE PCB	2CISA	351,18 €
MONTAJE DE CIRCUITO HORN	3BYMESA	50,00 €
Total		401,18 €
OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO ^{e)}		
Descripción	Empresa	Costes imputable
SUMNISTRO DE COMPONENT	RS	50,00 €
PLACA ARDUINO MEGA	BRICO GEEK	58,00 €
LEDS ENSAYO	DIOTRONIC	40,00 €
PEQUEÑO MATERIAL MECANI	OFICINA TECNICA UC3M	60,00 €
Total		208,00 €
^{e)} Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...		
6.- Resumen de costes		
Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales	
Personal	29.088,67 €	
Amortización	259,67 €	
Subcontratación de tareas	401,18 €	
Otros costes directos	208,00 €	
Costes Indirectos	5.991,50 €	
Total	35.949,02 €	